

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ

ОЗЕРО КУБЕНСКОЕ

ЧАСТЬ
I
ГИДРОЛОГИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ЛЕНИНГРАД — 1977

ВВЕДЕНИЕ

Постановлениями Партии и Правительства предусматривается обширный комплекс мероприятий по развитию сельского хозяйства нечерноземной области европейской части Советского Союза с целью оптимального использования всех природных богатств этих территорий. Одним из природных богатств Северо-Запада нашей страны являются пресные воды многочисленных рек, больших и малых озер. Развивающаяся промышленность и сельское хозяйство, а также рост численности населения в южных районах европейской части нашей страны требуют все большего количества чистой пресной воды. Для улучшения водообеспечения районов, относящихся к бассейну Каспийского моря, предполагается осуществить переброску части стока рек и озер северного склона европейской части СССР в бассейн р. Волги. Проектируемая переброска связана с изменением естественного режима этих водоемов, нарушением взаимоотношений физико-географических факторов. В число таких водоемов входят и крупные озера, расположенные на Северо-Западе СССР, - Кубенское, Воже и Лача.

До недавнего времени достаточно полные сведения, касающиеся различных сторон режима этих озер, в литературе отсутствовали. Перед Институтом озероведения АН СССР была поставлена задача всесторонне изучить их с тем, чтобы полученная лимнологическая характеристика могла быть положена в основу разработки мероприятий по рациональному их использованию различными отраслями народного хозяйства. Кроме того, Институту озероведения было поручено составление прогнозов ожидаемых изменений гидрохимического и гидробиологического режимов озер Кубенского, Воже и Лача после осуществления переброски части их стока в р. Волгу. Для решения поставленной задачи была создана Вологодско-Архангельская экспедиция, состоявшая из двух отрядов - кубенского, проводившего работы на одноименном озере, и северного, всесторонне исследовавшего озера Воже и Лача. Экспедиция проводила свои исследования в 1972-1974 гг.

Сбор полевого материала осуществлялся различными способами, основным из которых являлись комплексные рейсы, проводившиеся по постоянной сетке станций, охватывавшей все озеро. В них принимали участие гидрологи, гидрохимики и биологи. Проводились специализированные рейсы, во время которых изучались отдельные элементы режима озера. Комплексные сугочных станции позволили

получить представление о краткосрочных изменениях, а постоянно действовавшие в течение экспедиционного периода актинометрический, водомерный с самописцем уровня и другие посты давали возможность проследить долгосрочные изменения различных сторон режима водоема.

Итогом обработки и анализа полевых и литературных материалов является коллективная монография в трех частях, посвященная оз. Кубенскому.

В настоящей, первой, части приводится характеристика климатических особенностей бассейнов всех трех озер – Лача, Воже и Кубенского, а затем рассматривается гидрология последнего: его уровеньный режим, динамика водной массы (течения, волнение, сейши), термический режим воды и донных отложений, прозрачность и мутность воды и ее электропроводность. Рассчитаны водный, радиационный и тепловой балансы озера за многолетний период.

Вторая часть посвящена характеристике гидрохимического режима, вопросам распределения донных отложений и особенностям формирования различных растительных сообществ.

В третью часть вошли главы, касающиеся животного населения озера, а также прогноз изменений его режима при переброске части стока в р. Волгу. В ближайшем будущем предполагается выпуск монографии, посвященной озерам Лача и Воже.

Г л а в а . 1

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ БАССЕЙНА ОЗ. КУБЕНСКОГО

Озеро Кубенское находится на Северо-Западе СССР. В геологическом отношении район его расположения представляет собой заключенную в пределах Московской синеклизы северную часть Русской платформы. Основание Русской платформы, по данным геологического бурения, сложено кристаллическими породами — границами, гранито-гнейсами архейского и протерозойского времени — и залегает на глубине более 2 км.

На кристаллическом фундаменте сформировалась толща осадочных пород, представленных отложениями палеозойского возраста. Палеозойские породы, залегая с нарушением, образуют гигантскую складку — Московскую синеклизу.

В пределах водосбора озера осадочные породы обнажаются в широкой полосе, вытянутой с юго-запада на северо-восток в направлении от Рыбинского водохранилища к низовьям р. Мезени. Они представлены отложениями верхней перми татарского и казанского ярусов. Осадки последнего развиты в верховьях р. Кубены, в районе Конюшко-Няндомской возвышенности, в верхнем течении рек Уфтуги и Порозовицы и состоят из карбонатных пород: известняков, мергелей, доломитов, в нижней части разреза — песчаников, глин (Пахтусова, 1969).

Котловина оз. Кубенского имеет тектоническое происхождение, по времени относящееся к доледниковому периоду. „Заложение котловины связано с разломами кристаллического фундамента и опусканием его отдельных блоков (Кубенский грабен), прослеживающимся в мощном палеозойском осадочном чехле“ (Ауслендер, Гей, 1967, с. 10–11). Котловина сложена коренными осадочными породами татарского яруса нижнеустынского горизонта, в пределах которого расположена северная ее часть, и сухонского горизонта, который вскрывается южной частью озера.

По данным Н. А. Пахтусовой (1969), нижнеустынский горизонт представлен песчано-алевролитовыми отложениями, огипсованными в низах. Мощность горизонта более 100 м. Сухонский горизонт со средней мощностью 20–50 м сложен доломитами, мергелями различной окраски, встречаются пласты и линзы песка. Осадки сухонского горизонта — отложения пресных озер, которые характеризуются быстрой изменчивостью в вертикальном и горизонтальном направлениях (Садоков, 1957).

Осадочные породы перекрыты мощным слоем четвертичных отложений, прерывающимся только в местах образования речных долин. Средняя мощность четвертичных отложений – 5–15 м, в пределах холмистых участков – 80–110 м, а в пределах низин – до 40–80 м. Наибольшая мощность четвертичных отложений отмечается в районе Вологды в местах погребенных доледниковых долин – 154 м (Савинов, 1965). На юго-западном берегу оз. Кубенского, у д. Покровская Горка, по данным Гидропректа, коренные породы вскрыты буровыми скважинами на глубине 8–10 м от поверхности.

По происхождению четвертичные отложения относятся к ледниковым, озерно-ледниковым, озерным, озерно-аллювиальным, аллювиальным, флювиогляциальным и болотным образованиям различного возраста. Состав отложений разнообразен: глины, суглинки, пески, супеси, гравий, галька. Среди них часто встречаются шебень и валуны как местных пород, так и принесенных из других районов – кольско-карельских, тиманских и даже новоземельских (Савинов, 1965).

На большей части территории распространена морена последнего оледенения ($Q_3 gl$), слагающая участки моренной равнины в междуречьях Кубены и Вожеги, Кубены и Сухоны, а также участки холмистого рельефа некоторых возвышенностей. Морена (ледниковые отложения) представлена валунными суглинками и супесями желто-бурового, коричневого, серого, а иногда черного цвета. Это переработанные ледником коренные породы. Суглинки содержат валуны кристаллических пород и местных известняков. На обширных территориях (Бологодский район) морена перекрывается безвалунным покровным суглинком красновато- и палево-бурового цвета ($Q_3 pg l$).

Озерно-ледниковые отложения ($Q_3 lgl$) слагают коренные склоны котловины оз. Кубенского и поверхность высокой террасы. Они представлены суглинками и супесями, реже песками коричневыми, серыми и темно-серыми с содержанием гравия и гальки. Эти отложения довольно широкой полосой (в плане) окаймляют озеро. Значительные площади вдоль озера заняты древними озерными отложениями ($Q_3 l$), которые слагают вторую и частично третью террасы. По механическому составу это тонко- и мелкозернистые пески, коричневые и серые, сжелезненные, а также супеси с растительными остатками.

В долинах рек Кубены, Сухоны, Ельмы встречены древние озерно-аллювиальные отложения ($Q_3 l al$): красновато-коричневые тяжелые супеси и легкие суглинки с линзами песка или разнозернистые пески с линзами гравийно-галечного материала. Современные озерно-аллювиальные отложения слагают низкую террасу озера. Значительная их площадь прослеживается в устьях рек Кубены и Уфтуги. Они состоят из тонко- и мелкозернистых песков, супесей с линзами глин и суглинков, обычно темно-серого цвета, местами иловатые с растительными остатками.

Болотные образования широко развиты в приозерных низинах северной и южной частей побережья озера. Ими заняты междуречья Порозовицы и Ёды, Сухоны и Пучкаса, берег озера за Забслотской грядой. Это осоковые и моховые торфяники, черные и темно-коричневые, различной степени разложения и уплотнения, с корнями древесной и кустарниковой растительности.

Подземные воды рассматриваемого района приурочены как к четвертичным отложениям, так и к коренным породам. Они разнообразны: по происхождению, химическому составу и степени минерализации. Среди четвертичных отложений водоносными являются пески и супеси. Горизонты, содержащие воды, гидравлически связаны между собой из-за отсутствия выдержаных по площади водоупоров (Гидрогеология СССР, 1969). Воды четвертичных отложений в основном безнапорные, пресные, часто с запахом сероводорода, который быстро исчезает. По химическому составу они относятся к гидрокарбонатным кальциевым и иногда обладают повышенной минерализацией из-за подтока минерализованных вод коренных пород. Питаются эти воды в основном за счет атмосферных осадков. Основная их особенность – непостоянство режима и прерывистость распространения по территории (Савинов, 1965). Воды верхних горизонтов четвертичных отложений эксплуатируются шахтными колодцами глубиной до 2, 3-5 и от 5 до 10 м.

Внутри четвертичной толщи встречаются и напорные артезианские воды – воды межморенных отложений, как, например, флювиогляциальных отложений Кубено-Верхнесухонской низины, перекрытых озерно-ледниковыми глинами. Кроме того, в районе г. Вологды в четвертичных отложениях В.В.Лебедевым (1957) выделены два водоносных горизонта. Первый – на глубине 35-45 м, сложен сериами мелкоилистыми и мелкозернистыми песками и в нижней части содержит слой отсортированного крупнозернистого песка и гальки. Вода этого горизонта прозрачна, без запаха, с железистым привкусом. При отстаивании в ней образуется желтый осадок. По солевому составу она гидрокарбонатная магниево-кальциевая, имеет уструнную жесткость. Пригодна для питьевых целей после отстаивания и фильтрации через песчаные фильтры. Второй водоносный горизонт находится на глубине 65-80 м в так называемых желтых, розовых и светлых песках. Вода бесцветна, имеет быстро исчезающий запах сероводорода, по составу гидрокарбонатная кальциево-натриевая.

Осадочные дочетвертичные породы содержат пресную воду только там, где они выходят на поверхность (Савинов, Филенко, 1965). В основном это воды напорные, часто самоизливающиеся, минерализованные. Пермские отложения, слагающие котловину оз. Кубенского, почти повсеместно характеризуются сильно минерализованными водами. Подземные воды сухонского горизонта относятся к пластово-трещинным водам и приурочены к мергелям и доломитам, а также к прослоям песков, песчаников и известняков. Степень минерализации вод очень различна – от 1 до 25 г/л. Воды с минерализацией до 1 г/л – гидрокарбонатные кальциевые

и сульфатные кальциевые. Воды с минерализацией до 5 г/л по составу в основном сульфатные кальциевые и сульфатные натриевые, при большей минерализации – хлориднонатриевые.

Воды нижнеустьинского горизонта приурочены к песчано-алевитолитовым порсдам, в нижней части огипсованным. Среди них встречаются воды с минерализацией до 1 г/л гидрокарбонатного кальциевого и гидрокарбонатно-сульфатного натриевого состава, с минерализацией 1-3 г/л – сульфатного кальциевого и сульфатного натриевого состава (Буслаева, Федотова, 1969). Вологодская область вообще богата минерализованными солеными источниками (в р-не г. Вологды, Сокола, по берегам Сухоны, у д. Митинской Усть-Кубенского района).

Кубенская котловина имеет вытянутую с северо-запада на юго-восток форму. Ее протяженность около 100 км при ширине около 20 км. Наиболее отчетливо впадина оконтурена горизонталью 120 м. На юго-востоке она обрамляется Оларевской грядой, которая отделяет ее от Сухонской котловины. На севере и западе Кубенская котловина сливается с впадиной озера Воже и Пришекснинской низиной. На юго-западе к котловине озера примыкает Вологодская возвышенность с отметками до 257 м, кторая служит водоразделом Каспийского и Белого морей (Хомутова, 1969). К востоку от озера, в междуречьях Уфтюги и Кубены, Кубены и Сухоны, расположена Прикубенская равнина, для которой характерно чередование моренных гряд с плоскими участками.

Слоны котловины асимметричны: юго-западные – крутые, восточные – пологие. Коренные берега на юго-западе отходят от озера на 2 км, а на северо-востоке – на 10-16 км. На склонах котловины развиты береговые валы и террасы – следы древнего убывающего водоема. Вопрос о количестве террас окончательно не решен. Р.В.Бобровский (1957), В.Г.Аусландер и В.П.Гей (1967), например, выделяют три четко выраженные террасы с отметками 120-124, 115-118 и 110-114 м. Нижняя терраса высотой 110-114 м – затопляемая пойма современного озера. Она повсеместно развита по берегам озера и сложена мелко- и тонкозернистыми песками. Ее ширина на юго-западном берегу составляет 50-200 м, на северо-восточном увеличивается до 6 км. Здесь расположено много мелких озер (наиболее крупные из них Токшинские озера) и дельта р. Кубены с 15 рукавами (Бобровский, 1957). Поверхность террасы заболочена, покрыта кочками и береговыми валами. Вторая и третья террасы тоже хорошо прослеживаются вдоль озера. Поверхность их наклонена в сторону озера, а ширина колеблется от нескольких метров до 1 км. Более высокие террасы постепенно расширяясь, переходят в окружающие озеро равнины с участками холмистого и грядового рельефа.

Климатические условия района определяются взаимодействием радиационных и циркуляционных факторов, причем циркуляционные играют главную роль. Для района характерным является частое вторжение арктических масс воздуха, интенсивная циклоническая деятельность

и неустойчивость погоды. Атлантический воздух вызывает зимой потепление, пасмурную погоду, обильные осадки. Нередко вторжение атлантических масс сопровождается оттепелью и туманами. Летом эти воздушные массы приносят переменную облачность с осадками, похолодание и ветер. Арктическим воздушным массам сопутствует антициклональный тип погоды.

Влияние Атлантики на территории области убывает с запада на восток, что сказывается в увеличении в том же направлении континентальности, увеличении амплитуды температуры воздуха и уменьшении ее среднего годового значения и т.д. Так, в Белозерске средняя многолетняя температура воздуха в январе составляла -11.4° , в Вологде -11.8° , в Великом Устюге -13.8° , в июле 17.2° , 16.9° и 17.3° , соответственно, а средние годовые значения температуры в этих же пунктах равны 2.4° , 2.2° , 1.4° .

А.А. Борисов (1958) на основании исследования климатообразующих факторов природы Вологодской области дал схему ее климатического районирования. Район оз. Кубенского он выделяет в отдельный район, особенностью которого по сравнению с западными районами являются процессы трансформации воздушных масс и рост суммарной радиации.

Согласно показаниям ст. Коробово, здесь обычно наиболее холодный месяц — январь с температурой воздуха -11.6° , а самый теплый — июль с температурой 17.2° . Но иногда самым холодным месяцем бывает февраль, а самым теплым — август. В зависимости от преобладания того или иного типа циркуляции атмосферы температура воздуха и другие метеоэлементы испытывают значительные колебания. За последние 23 года (1951—1973 гг.) самая низкая средняя месячная температура воздуха в январе составляла -20.4° (1968 г.), а максимальная — -4.8° (1971 г.). Соответствующие экстремальные значения средней месячной температуры за июль — 20.9° (1972 г.) и 13.5° (1956 г.). Средняя годовая температура воздуха за этот период на ст. Коробово составила 2.2° , амплитуда ее колебания — 0.5 (1956 г.) -3.4° (1961 г.).

Зима в районе умеренно холодная, но продолжительная — до 5—6 месяцев. Первые заморозки отмечаются даже в сентябре, но начало зимы определяется сроком появления устойчивого снежного покрова, что, согласно показаниям ст. Коробово, в среднем наблюдается во второй половине ноября. Продолжительность периода с устойчивым морозом составляет 120 дней. Последний заморозок в анализируемый отрезок времени зарегистрирован 18 мая. Длительность безморозного периода в среднем насчитывает 123 дня при крайних ее значениях 108 и 168 дней.

Среднее многолетнее количество осадков равно 666 мм, максимальное — 815 мм (1966 г.), минимальное — 472 мм (1972 г.). Большая часть — 418 мм — выпадает в теплый период года (IV-X), что составляет 63% от годовой суммы. На осадки холодного периода приходится меньшая доля суммарных за год, и это обуслов-

лено более устойчивой в этот период стратификацией воздуха и тем обстоятельством, что их выпадение связано главным образом с прохождением циклонов. Зимние осадки более продолжительны, но менее интенсивны, чем летние (Антипов, 1957). Они выпадают в основном в виде снега, но часто бывают и смешанными, а в отдельные годы и дождевыми.

Устойчивый снежный покров появляется в конце октября (в среднем 27 X) и держится до 160 дней, разрушаясь к середине апреля (17 IV) и практически исчезая к концу его. Максимальный рост снежного покрова происходит от ноября к январю, т.е. в месяцы циклонической деятельности, когда и создаются основные запасы снега (Антипов, 1957). Наибольшей мощности снежный покров достигает во II-III декаде марта. Его высота зависит от степени защищенности участка от ветра и составляет 44-55 см.

Развитие циклонической деятельности сопровождается образованием плотных облаков, поэтому облачность в районе высокая – от 6 до 8.5 баллов; наименьшие ее значения отмечаются в весенне-летние месяцы. Число пасмурных дней достигает 172 в году с минимальными значениями летом – 9.4 (июль).

Согласно показаниям ст. Коробово, преобладающими в течение года являются ветры юго-западного и западного направлений, повторяемость которых составляет соответственно 21 и 18% общего числа случаев в году. В летние месяцы (май–июль) их повторяемость несколько уменьшается и увеличивается доля ветров с северной и северо-западной составляющими. Средняя годовая скорость ветра невелика – 4.3 м/сек., летом она несколько меньше (3.8 м/сек.), чем зимой (4.8 м/сек. в декабре). Усиление ветра зимой вызвано усилением циклонической деятельности. Повторяемость ветров в диапазоне 0–5 м/сек. составляет 68–75% в год.

Основными факторами почвообразования являются климат, растительность и почвообразующие породы. Почвы формируются на четвертичных наносах, которые представлены в основном песками, супесями и суглинками. По характеру растительности рассматриваемый район относится к подзоне хвойных лесов. Количество осадков и тепла, их распределение в году определяют водный и тепловой режим почвы, отражаясь на процессе почвообразования. Совокупность всех факторов приводит к тому, что почвы района относятся главным образом к категории подзолистых и дерново-подзолистых, формирующихся на валунных и покровных суглинках. На карбонатных породах развиты дерново-карбонатные почвы, отличающиеся высоким плодородием. Они широко распространены в Вологодском и Сокольском районах. На речных террасах развиты аллювиальные почвы, в основном луговые, которые заливаются водой во время половодья. На пониженных местах при избыточном увлажнении образуются почвы болотного типа. В результате хозяйственной деятельности человека, сведения и распашки лесов широкое распространение получили окультуренные почвы.

Равнинность территории, влажность климата, небольшой врез речных долин, неглубокое залегание зеркала грунтовых вод приводят к сильному заболачиванию. Вологодская область по размерам болот и запасам торфа занимает первое место среди других областей РСФСР. Болота распространены по территории неравномерно: в основном в пределах бывших озер и северо-ледниковых равнин, на террасах озер и в поймах рек (Филенко, 1966). Заболоченность водосбора изменяется от 1 до 30%. Незначительной заболоченностью (1%) выделяется междуречье Вожеги и верхнего течения Кубены, где расположена Кеношско-Няндомская возвышенность. Область, прилегающая к среднему течению р. Кубены, заболочена на 2-5%. В районе Вологодско-Грязовецкой возвышенности, к юго-западу от озера, площадь, занятая болотами, составляет 2%. Междуречье Кубены и Уфтуги в их нижнем течении заболочено на 15%. Наибольшей заболоченностью отличается территория, окружающая оз. Кубенское, и Верхнесухонская низменность, где заболоченность достигает 30% (Абрамова, 1965).

Распространены как верховые, так низинные и переходные болота при преобладании верховых. Последние превосходят другие типы и по размерам и по запасам торфа. Крупные верховые болота (свыше 10 тыс. га) встречаются в Кубенской впадине и бассейне р. Сухоны. Верховые болота водораздельных пространств обладают торфяной залежью значительной мощности: средняя – 3-3.5 м, наибольшая – свыше 7 м (Абрамова, 1965). Верховые болота речных долин, образующиеся на второй и третьей надпойменных террасах, невелики и неглубоки (3-4 м). Они являются источниками добычи торфа. Вокруг озера и по р. Сухоне распространены наиболее крупные низинные болота, среди которых встречаются лесные и безлесные. Они используются как кормовые угодья. К юго-западу от озера территория из-за большей расчлененности рельефа заболочена незначительно. Здесь распространены переходные болота, использующиеся в качестве пастбищ.

При среднем многолетнем уровне 109.4 м площадь зеркала озера составляет 400 км^2 , объем – 1.02 км^3 , средняя глубина – 2.5 м, максимальная глубина на фарватере – 4.5 м. В связи с тем, что берега озера низкие, плоские, его морфометрические характеристики меняются очень резко даже при колебаниях уровня в течение года (Малинина, Татаринова, 1974). Так, например, по морфометрическим данным, снятым с карты и относящимся к отметке уровня 110 м, площадь зеркала – 417 км^2 , длина – 54 км, наибольшая ширина – 10 км, средняя глубина – 2.9 м, объем – 1.2 км^3 (Кириллова, 1974).

Показатель удлиненности озера, равный 7.3, характеризует озеро в плане, а показатель открытости определяет меру подверженности водоема внешнему воздействию и представляет собой отношение площади озера к средней глубине. Для оз. Кубенского он равен 160. Площадь водосборного бассейна озера равна 14440 км^2 . Удельный водосбор – 36.1.

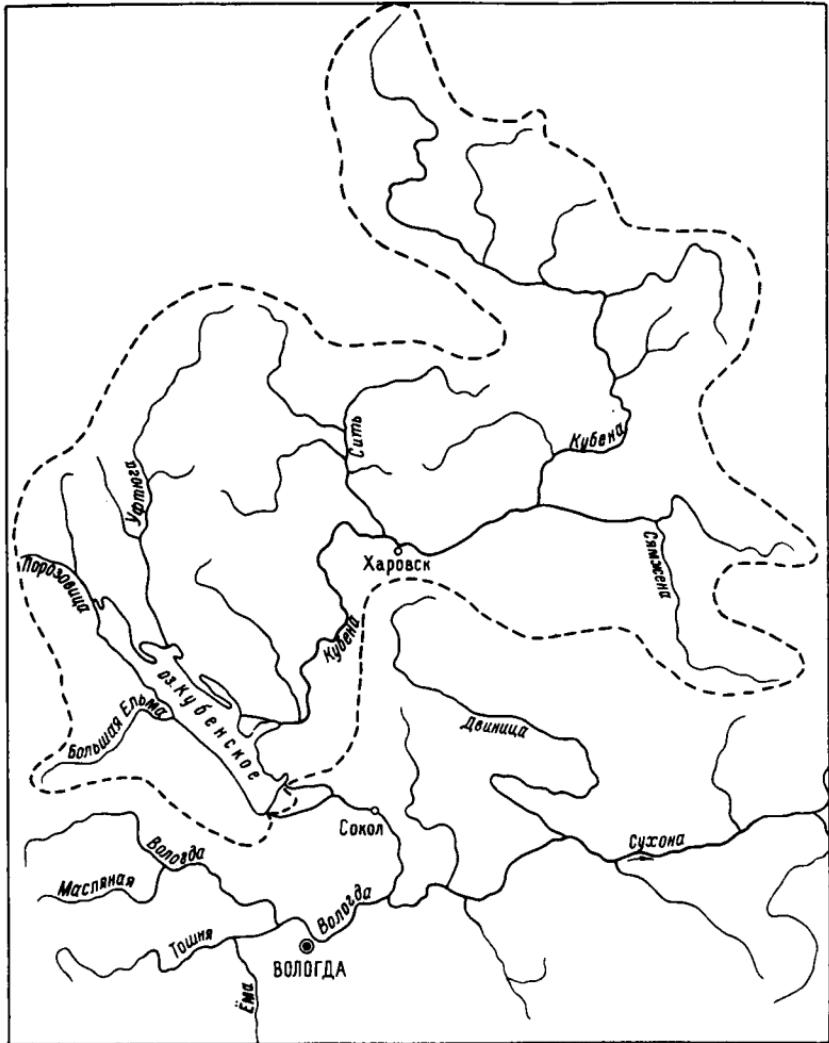


Рис. 1. Схема бассейна оз. Кубенского.

Бассейн имеет асимметричную относительно положения озера форму (рис. 1), вытянутую в широтном направлении примерно на 200 км. Он представляет собой моренную слабоволнистую равнину, залесенную на 80% (разд. 3.1, наст. изд.), с расчлененностью рельефа 25–50 м (Стеблин-Каменская, 1962) и густотой речной сети 0.35 км/км². В северной части водосбора, в верхнем течении р. Кубены, находится район с пересеченным холмистым и увалистым рельефом и густой речной сетью (0.50 км/км²). ТERRитория, непосредственно прилегающая к озеру, – район развития плоских

слабо дренированных озерно-ледниковых и озерных равнин с расчлененностью рельефа 0,25 м и замедленным стоком.

Особенности рельефа (равнинность территории), климата (избыток влаги), геологии (наличие моренных и ленточных глин) определяют развитие речной сети. Водоразделы рек низкие и плоские, реки близко подходят друг к другу. Они спокойны и медлительны, лишь на пересеченных участках характер их течения меняется. Притоки озера относятся к типу рек преимущественно снегового питания. Они характеризуются высоким половодьем и низкой летней меженью, нарушенной дождовыми паводками, особенно в осенний период.

Согласно опубликованным данным, в оз. Кубенское впадает 80 речек и ручьев (Ильинский, 1922). На топографической карте их около 30. Наиболее крупные реки находятся на восточном побережье, реки западного побережья более многочисленные, но невелики по длине (10–20 км) и объему стока (Кириллова, 1974). Самая крупная река – Кубена, на долю которой приходится около 80% речных вод, втекающих в озеро, а ее водосбор равен 11000 км². Вторая по водности – р. Уфтуга, с объемом стока около 9%. Река Порозовица дает лишь 6% общего притока рек. Роль остальных рек в притоке незначительна. Из озера вытекает р. Сухона, несущая свои воды в Северную Двину.

Озеро Кубенское входит в состав Северо-Двинского водного пути, который соединяет бассейны Белого и Каспийского морей. Система построена в 1825–1828 гг. Она начинается на р. Шексне у д. Топорня и заканчивается на р. Сухоне шлюзом „Знаменитый“, расположенным в 7,5 км от оз. Кубенского. Общая протяженность системы – 127 км. В состав ее входят Топорниковский канал, соединяющий р. Шексну с оз. Сиверским, Кузьминский канал, оз. Покровское (Бабье), р. Поздышка, оз. Зауломское, два Вазеринских канала, оз. Кишемское, Кишемский канал, нижнее течение р. Итклы, оз. Благовещенское, р. Порозовица, оз. Кубенское, р. Сухона. Основные грузы, транспортируемые по системе, – лес и строительные материалы.

Кроме транспортного, озеро имеет большое рыбопромысловое значение. Вылов рыбы за 1965–1970 гг. составил 2500–4850 ц. В озере обитает 19 видов рыб: судак, лещ, щука, налим, язь, окунь, плотва и наиболее ценные – нельма и сиг-нельмушка (Савинов, Воропанова, 1957). Кубенская нельма – представитель семейства лососевых – имеет большое значение как объект акклиматизации в другие водоемы страны. После постройки плотины „Знаменитой“ кубенская нельма обособилась от нельмы северодвинской и превратилась в местную жилую форму. Главные нерестилища нельмы находятся на реках Кубене и Большой Ельме. Рыба отличается высокими вкусовыми качествами и быстрыми темпами роста, выделяющими ее среди других обитателей водоема. В настоящее время вылов ее запрещен, а для увеличения стада предполагается строительство рыболовецкого завода в Усть-Кубенском районе на р. Кубене.

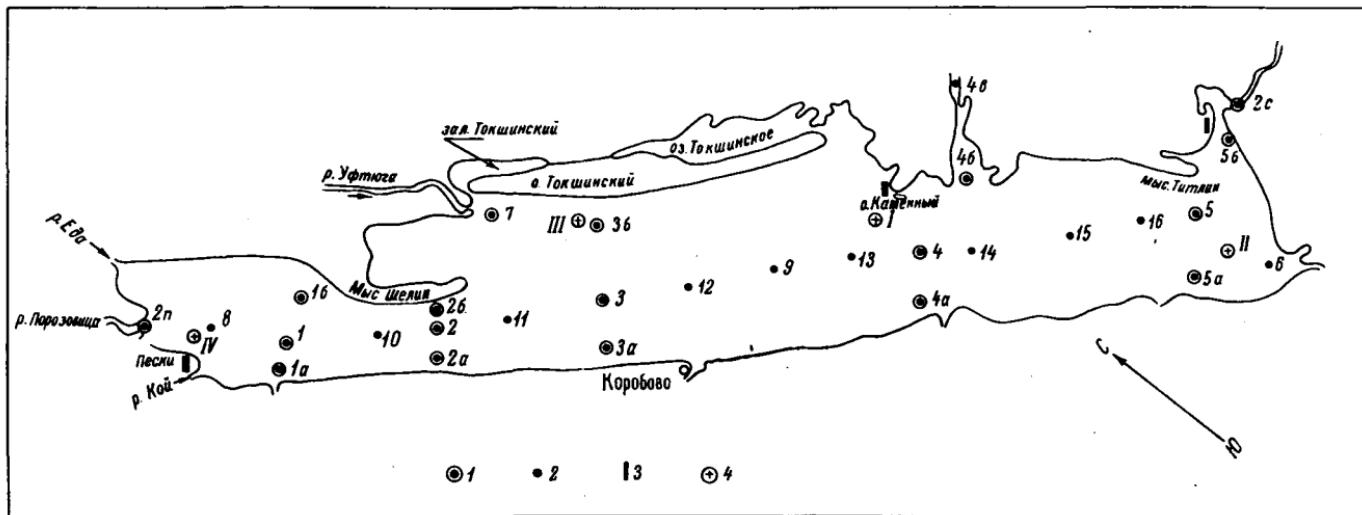


Рис. 2. Схема оз. Кубенского.

1 - станции, где проводились наблюдения по полной программе; 2 - станции, где проводились наблюдения над отдельными элементами; 3 - лимнографные установки; 4 - актинометрические посты.

В целях увеличения рыбных уловов запрещен вылов леща в период нереста, проводится отлов малоценной рыбы, уничтожающей кормовую базу леща и судака. Для пополнения стада судака и леща намечается выпуск в озеро 25-30 млн личинок этих рыб.

Природные условия района проявляются в особенностях жизни самого озера. В связи с предполагаемой переброской части стока северных рек в бассейн р. Волги, трасса которой пройдет по оз. Кубенскому, Институту озероведения АН СССР было предложено составить прогноз гидробиологического и гидрохимического режимов озера.

Архангельско-Вологодская экспедиция проводила гидрологические, гидробиологические, гидрохимические исследования и изучение донных отложений озера в 1972-1974 гг. по постоянной сетке станций (рис. 2), включающей пункты комплексных наблюдений (1-5, 2п, 7, 2с) и наблюдений над отдельными элементами (6, 8-16). В нижеприведенных главах изложены результаты проведенных исследований.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ОЗЕР ЛАЧА, ВОЖЕ И КУБЕНСКОГО

Район исследуемых озер принадлежит зоне избыточного увлажнения европейской части СССР. Для территории характерен континентальный климат лесной зоны с умеренно теплым летом и умеренно холодной зимой, формирующийся под воздействием радиационных и циркуляционных факторов, которые, находясь в зависимости от широты места, в свою очередь испытывают влияние местных условий.

Особенности климата района и основные его закономерности изложены в работах Н.П.Антипова (1957), А.А. Борисова (1958), А.И. Овчинниковой (1966), в «Агроклиматических ресурсах Вологодской области (1972)» и «Ресурсах поверхностных вод Северного края» (т. 3, 1972), что исключает необходимость подробно останавливаться на этом вопросе.

Изменчивость отдельных элементов климата обусловлена действием определенных типов (форм) атмосферной циркуляции. Каждая форма циркуляции (западная – W, восточная – E, меридиональная – C) сопровождается вторжением на территорию воздушных масс разного происхождения и свойств. В зависимости от преобладания в каждом конкретном месяце того или иного типа циркуляции формируется и тип этого месяца по условиям погоды и в первую очередь по режиму основных факторов жизни – термических условий и условий увлажнения. В настоящее время установлено, что колебания климата обусловлены изменениями интенсивности атмосферной циркуляции, происходящими в свою очередь под влиянием процессов, совершающихся на Солнце. Периодические изменения солнечной активности приводят через атмосферную циркуляцию к климатическим колебаниям.

Климат в районе озер Лача, Воже и Кубенское в последние 2–3 десятилетия и в настоящее время не испытывал длительных изменений. Ему свойственны лишь периодические, кратковременные, выражющиеся в некотором повышении или понижении температуры, увеличении или уменьшении осадков, облачности и других элементов (Антипов, 1957), что вытекает из сравнения средних многолетних и осредненных за различные периоды величин основных метеорологических элементов (табл. 1).

В работах ряда авторов неоднократно отмечалось, что климатические характеристики должны базироваться не на обобщениях и осреднениях за максимально длительный период, а представлять

Т а б л и ц а 1

Осредненные за различные периоды величины метеорологических элементов

Период	Температура воздуха, °С			Абсолютная влажность, мб			Скорость ветра, м/сек.			Осадки, мм		
	XI-III	IV-X	за год	XI-III	IV-X	за год	XI-III	IV-X	за год	XI-III	IV-X	за год
Оз. Лача (ст. Каргополь)												
Многолетний	-9.0	9.0	1.5	3.1	9.5	6.8	4.8	4.0	4.3	242	448	690
1951-1973	-9.3	9.1	1.4	3.0	9.4	6.8	4.3	3.6	3.9	277	499	776
1951-1962	-8.8	9.0	1.6	3.1	9.5	6.9	4.7	3.9	4.2	251	497	748
1963-1973	-9.9	9.1	1.2	3.0	9.4	6.7	3.8	3.2	3.5	304	501	805
Оз. Воже (ст. Чарозеро)												
Многолетний	-8.6	9.4	1.9	3.2	9.7	7.0	4.7	3.9	4.2	303	454	757
1951-1973	-8.7	9.4	1.8	3.1	9.3	6.9	4.2	3.6	3.9	286	510	796
1951-1962	-8.3	9.3	2.0	3.2	9.0	7.0	4.5	3.8	4.1	270	529	799
1963-1973	-9.1	9.5	1.6	3.1	9.6	6.8	3.9	3.4	3.6	304	491	795
Оз. Кубенское (ст. Коробово)												
Многолетний	-8.3	10.0	2.3	3.2	10.1	7.2	4.9	4.4	4.6	248	418	666
1951-1973	-8.6	10.0	2.2	3.1	9.9	7.2	4.5	4.1	4.3	192	408	600
1951-1962	-8.2	9.9	2.4	3.2	9.8	7.2	4.4	4.0	4.2	171	427	598
1963-1973	-9.1	10.2	2.0	3.1	9.9	7.1	4.6	4.2	4.5	214	386	600

П р и м е ч а н и е. Здесь и далее в этой главе за многолетний принят период, к которому приведены данные различных элементов в „Справочниках по климату СССР“.

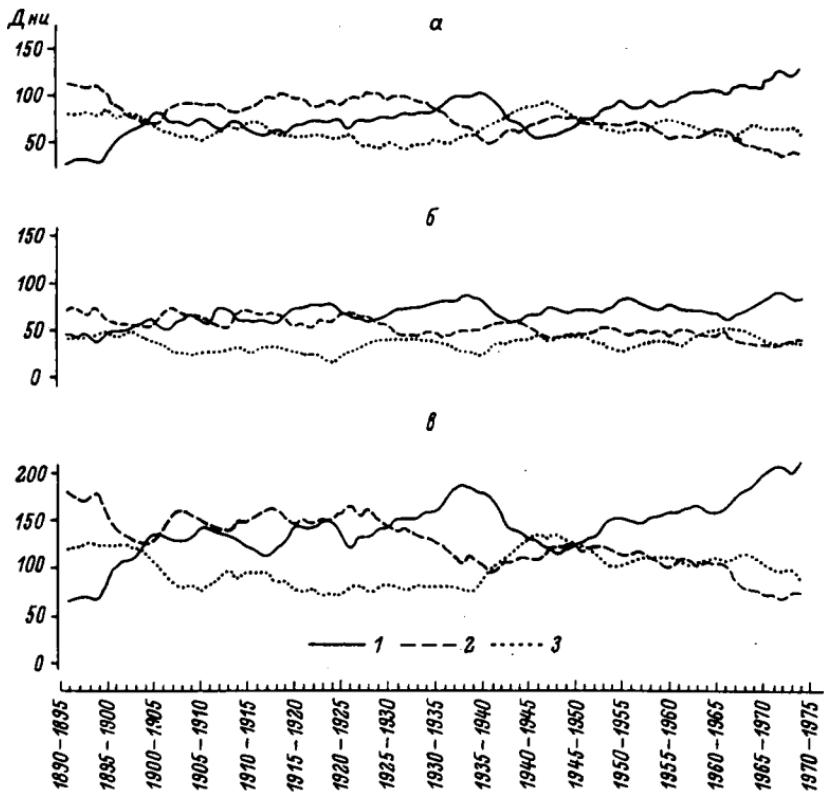


Рис. 3. 6-летние скользящие числа дней с разными формами атмосферной циркуляции за теплый (а) и холодный (б) периоды года и в целом за год.

1 – восточная (E); 2 – западная (W); 3 – меридиональная (C).

собой набор характеристик, отнесенных к циркуляционным эпохам (Дээрдзеевский, 1956), или циклам увлажнения (Шнитников, 1966). В настоящий момент пересмотр всей совокупности климатологической информации с точки зрения репрезентативности средних многолетних величин для отдельных макроциркуляционных периодов и эпох можно считать нацревшим (Адаменко, 1975).

Период с 1951 по 1973 г., выделенный по водности и принятый за расчетный для составления водного и теплового баланса, охватывает полный цикл изменчивости общей увлажненности в районе озер Лача, Воже и Кубенское. Однако для понимания хода дальнейших событий и тем более предопределения их (Кириллова, 1974) важно выяснить его положение в ряду других циклов внутривековых колебаний. Для анализа многолетних данных был использован метод перекрывающихся (скользящих) средних, предложенный Е.С.Рубинштейн (1946) и впоследствии широко применяе-

Т а б л и ц а 2

Повторяемость (в %) форм циркуляции
за различные периоды

Периоды	XI-III			IY-X			За год		
	W	E	C	W	E	C	W	E	C
1891-1960	36	43	21	38	32	30	37	37	26
1951-1973	27	49	24	23	48	29	25	47	28
1951-1962	30	50	20	28	43	29	30	42	28
1963-1973	23	49	28	19	53	28	21	51	28

мый многими исследователями (Шнитников, 1961, 1962, 1966; Яковлев, 1970; Смирнова, Коновалова, 1975 и др.). Нами принято осреднение за 6 лет.

В качестве метеорологических элементов, в общих чертах характеризующих многолетние колебания увлажненности территории, использованы температура и влажность воздуха, атмосферные осадки в их средних месячных значениях применительно за теплый (IY-X) и холодный (XI-III) периоды года, сезоны года и отдельные месяцы теплого периода.

В работе использованы данные по основным метеорологическим элементам нескольких станций ГМС района исследований (Каргополь, Чарозеро, Коробово, Котлас) за многолетний период, почерпнутые из Справочников по климату СССР (вып. 1, ч. 1, 2, 3, 4), а также из Метеорологических ежемесячников (вып. 1) и фондов Вологодской и Архангельской ГМС за последние годы. Анализ многолетних колебаний метеорологических элементов проведен на фоне анализа изменений атмосферной циркуляции.

Изменчивость атмосферной циркуляции в разные периоды года в перекрывающихся средних представлена на рис. 3. Как видно из него, период 1951-1973 гг. можно полностью отнести к эпохе, выделенной А.А.Гирсом (1959) как Е + С, начавшейся с 1949 г. Сравнением этого периода с многолетним (1891-1960 гг.) по изменчивости основных форм циркуляции легко установить господствующее в течение него развитие восточной (Е) и повышенное - меридиональной (С). Модульный коэффициент восточной формы за год составил 1.27, меридиональной - 1.08 и западной - 0.68.

Циркуляционную эпоху, начавшуюся с 1949 г., можно разделить по времени на две части - 1949-1963 гг. и 1964-1973 гг., в последнюю из которых имело место значительное перераспределение повторяемости западной (W) и восточной (E) форм. Эти периоды практически совпадают с различными фазами водности, составляющими полный цикл внутривековой увлажненности в бассей-

Т а б л и ц а 3

Повторяемость (в %) форм циркуляции в аномальные годы

Год	I-III, XI-XII			IY-X			За год		
	W	E	C	W	E	C	W	E	C
1966	15	68	17	24	53	23	21	58	21
1972	25	56	19	7	76	17	14	68	18

нах рассматриваемых озер. Мы будем рассматривать как весь период в целом (1951-1973 гг.), так и отдельные его фазы водности: многоводную (1951-1962 гг.) и маловодную (1963-1973 гг.) (табл. 2).

На фоне явного преобладания восточной (E) формы за период 1951-1973 гг. и равномерного ее распределения в течение всего холодного периода года заметно значительное увеличение ее в теплый период и за год в целом маловодной фазы (51-53%) за счет уменьшения западной (W). Меридиональная (C) форма циркуляции отличалась равномерным распределением в течение всего 23-летнего периода в теплое время года и за год в целом и была несколько ослаблена в холодный период многоводной фазы (20%).

Аномальными по термическим условиям и увлажнению годами за рассматриваемый период можно считать 1966 г. (холодный, с обильными осадками) и 1972 г. (теплый, с малым количеством осадков). Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при значительном развитии формы (E) в оба года существенно увеличивалась ее роль в холодный период 1966 г. и в теплый 1972 г. (табл. 3).

Анализ многолетних колебаний метеорологических элементов

Многолетние колебания метеорологических элементов в известной мере взаимосвязаны между собой, поскольку они зависят от циркуляционных условий. Поэтому их целесообразнее рассматривать не изолированно, а в комплексе.

По многолетним данным, термические условия Северо-Запада изменяются с запада на восток. В этом направлении увеличивается суровость зим. Средняя многолетняя температура воздуха на значительной территории (от Псковско-Чудского озера до устья р. Су-

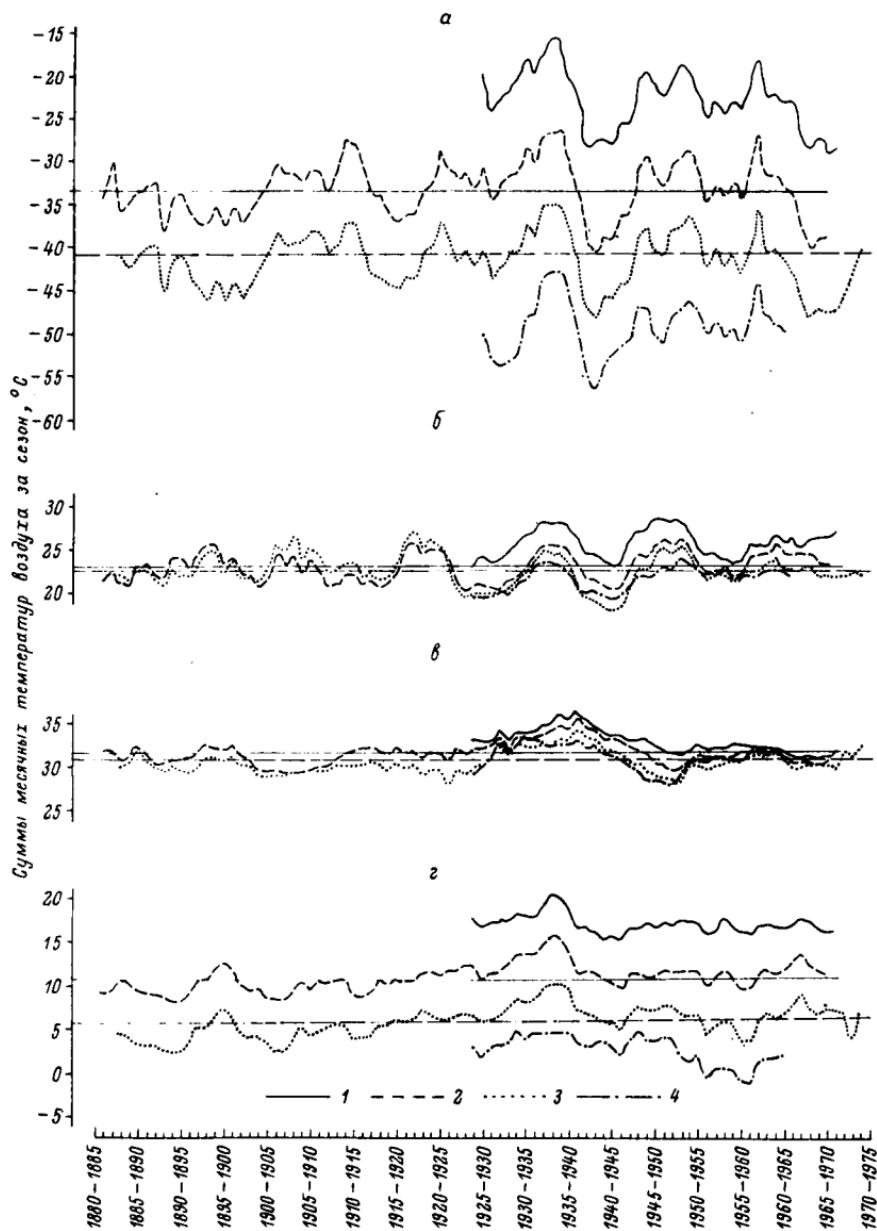


Рис. 4. 6-летние скользящие суммы месячных температур воздуха за гидрологические сезоны по показаниям станций Тийрикоя (1), Вознесенъе (2), Каргополь (3), Яренск (4).

а - зима (XII, I-III); б - весна (IV-VI); в - лето (VII-VIII); г - осень (IX-XI).

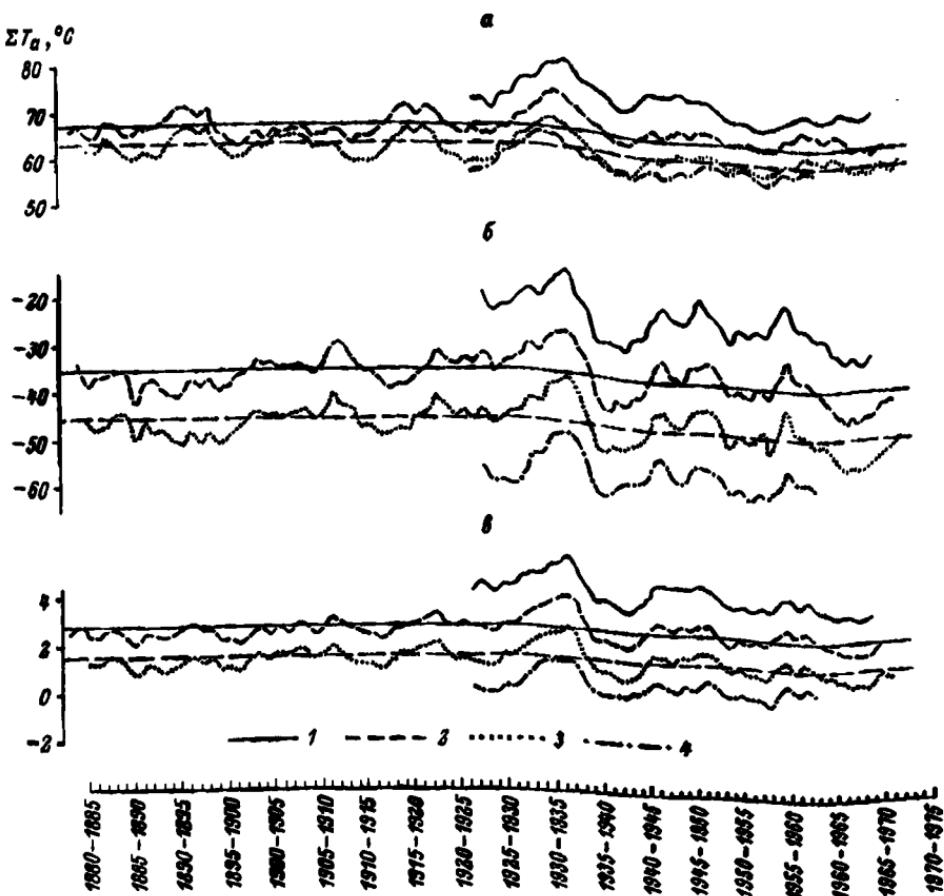


Рис. 5. 6-летние скользящие суммы месячных температур воздуха за теплый (а) и холодный (б) периоды года и в целом за год (в) по показаниям станций Тирикова (1), Вознесене (2), Кергополь (3), Яренск (4).

хонь!) существенно уменьшается, изменяясь от $4,4^{\circ}$ на западе (ст. Тирикова) до $0,2^{\circ}$ на востоке (ст. Яренск).

Распределение температуры воздуха по сезонам (рис. 4) свидетельствует о существенных различиях в термических условиях между станциями осенью и зимой. В свою очередь весной и летом на территории, простирающейся по долготе на 22° , эти различия невелики. На 6-летних скользящих отчетливо проявляются периоды (фазы) теплые и прохладные (с температурами выше и ниже нормы!). Обращает на себя внимание значительное (по сравнению с средней многолетней) понижение температуры с конца 50-х годов зимой и, наоборот, повышение осенью. В период интенсивного раз-

вития жизни в озерах (весной и летом) термические условия территории сходны. Различия в скорости протекания биологических и гидрохимических процессов определяются местными факторами и особенностями конкретных водоемов. Поэтому при анализе изменчивости многолетних колебаний других элементов мы будем рассматривать не сезоны (которые выделяются большей частью условно), а холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды и более детально отдельные месяцы теплого периода (рис. 5).

Синхронность чередования подъемов и понижений на температурных кривых подтверждает известное положение об однообразии изменения температуры воздуха на значительной территории. Это и понятно, поскольку изменения в режиме циркуляции охватывают большие пространства и тип погоды устанавливается один и тот же. Отсюда следует, что об изменчивости условий из года в год можно судить по отклонениям средних месячных температур от их средних многолетних значений, полученных на основе материалов только одной станции, принятой за опорную. В нашем случае в таком качестве выступает ст. Каргополь, как имеющая наиболее длинный ряд наблюдений.

Для мелководных озер в период открытой воды характерна прямая связь между термическими условиями водной поверхности и окружающего воздуха. Поэтому при анализе изменений термического режима водоема следует иметь достаточно ясное представление о колебаниях температуры воздуха не только за короткий период, но и предшествующий длительный. С этой целью был проведен анализ изменчивости термических условий в многолетнем разрезе по показаниям ст. Каргополь; рассмотрены данные по температуре воздуха за циркуляционные эпохи, годы, сезоны года, отдельные месяцы теплого периода в сравнении со средней многолетней; рассчитаны отклонения температуры воздуха за эпохи (по А.А. Гирсу) от средних многолетних (табл. 4).

Как показывают данные (табл. 4), самое сильное повышение температуры в районе исследований наблюдалось в период 1929–1939 гг., когда преобладал восточный тип циркуляции. Наибольшим потеплением отличался холодный период года (1.1° за месяц). Самое сильное похолодание наблюдалось в период 1940–1948 гг. в эпоху меридиональной циркуляции, отразившейся наиболее резко также на холодном периоде. За последнюю циркуляционную эпоху в целом термические условия были более однородными: несколько ниже нормы холодный период и немного выше теплый. Внутри самой эпохи период 1949–1963 гг. выделяется высокими температурами, при этом вторая половина (1964–1973 гг.) была более прохладной по сравнению с остальными периодами этой эпохи главным образом за счет низких температур воздуха в холодный период года. Все эти особенности, выявленные на основании анализа данных по ст. Каргополь, легко устанавливаются и по показаниям других станций, использованных для характеристики термических

Таблица 4

Отклонения средних за эпохи температур воздуха от многолетней (в град./месяц)

Эпоха	Период	Тийрикоя			Вознесенье			Каргополь ^{*)}			Котлас		
		XI-III	IV-X	I-XII	XI-III	IV-X	I-XII	XI-III	IV-X	I-XII	XI-III	IV-X	I-XII
W + C	1891-1899	-	-	-	-0.9	+0.1	-0.3	-0.7	-0.03	-0.4	-	-	-
W	1900-1928	-	-	-	+0.1	-1.2	-0.1	-0.04	-0.1	-0.04	-	-	-
E	1929-1939	+1.5	+0.1	+0.8	+1.2	+0.6	+0.8	+1.1	+0.4	+0.7	+1.3	+0.6	+0.7
C	1940-1948	-0.8	-0.4	-0.5	-1.1	-0.01	-0.4	-0.9	-0.2	-0.5	-0.5	-0.3	-0.4
E + C	1949-1973	+0.2	-0.6	-0.2	+0.04	+0.1	0.0	-0.1	+0.06	0.0	+0.04	+0.1	+0.1
	1949-1963	+0.6	-0.5	0.0	+0.4	+0.2	+0.2	+0.2	+0.1	+0.1	+0.4	+0.2	+0.3
	1964-1973	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	+0.04	-0.3	-0.6	+0.03	-0.2	-0.6	-0.03	-0.2

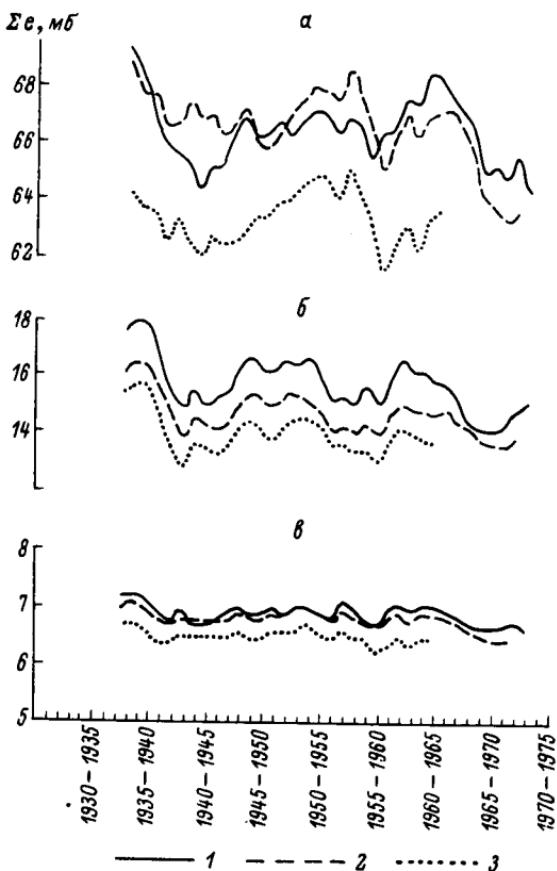


Рис. 6. 6-летние скользящие суммы месячных величин абсолютной влажности за теплый (а) и холодный (б) периоды и в среднем за год (в) по показаниям станций Каргополь (1), Котлас (2), Яренск (3).

условий территории, и вполне соответствуют описанным в литературе (Яковлев, 1970).

Изменчивость температуры воздуха в отдельные месяцы колеблется в значительных пределах, особенно в переходные периоды (табл. 5). Ряды с данными наблюдений по осадкам и абсолютной влажности в районе исследования короче, чем по температуре воздуха. В нашем распоряжении в основном были материалы начиная с 1936 г. Анализ многолетних колебаний осадков и абсолютной влажности воздуха проведен в рамках теплого (IV-X) и холодного (XI-III) периодов года. 6-летние скользящие месячные суммы абсолютной влажности за указанные периоды (рис. 6) свидетельствуют о незначительных ее колебаниях во времени. Синхронность чередования подъемов и понижений кривых абсолютной влажности четко

Т а б л и ц а 5

Коэффициент изменчивости (C_v) и среднее квадратическое отклонение (σ , $^{\circ}\text{C}$) температуры воздуха за 1883-1973 гг.
(ст. Каргополь)

	IY	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
C_v	2.3	0.30	0.15	0.12	0.12	0.18	1.4	0.62
$\pm \sigma$	2.3	2.4	2.1	1.9	1.7	1.5	2.2	2.6

проявляется в холодный период. В теплое время года эта закономерность часто нарушается. В холодный период отчетливо заметно уменьшение абсолютной влажности к востоку. Размах колебаний по сравнению с температурой воздуха значительно меньше.

Расхождение в суммах месячных величин абсолютной влажности по станциям Котлас и Яренск в холодный период находится в пределах 1 мб, а в теплый период увеличивается до 3-4 мб. Годовые величины абсолютной влажности по станциям Котлас и Каргополь практически одинаковы, а по ст. Яренск постоянно на 0.4-0.5 мб ниже. Сравнением абсолютной влажности воздуха с температурой в рассматриваемые периоды года и за год в целом по станциям Каргополь и Котлас установлена устойчивая линейная связь между ними во всем диапазоне изменения температуры воздуха: чем выше температура воздуха, тем больше абсолютная влажность. Таким образом, с помощью уравнений связи можно по температуре воздуха удлинить ряды абсолютной влажности.

Количество атмосферных осадков в районе озер Лача, Воже и Кубенское в течение всего года определяется главным образом активной циклонической деятельностью. Особенно обильные осадки вызывают циклоны, приходящие из районов Черного и Средиземного морей. Циклоны с Атлантики приносят осадки менее интенсивные, но более продолжительные. В соответствии с развитием и движением циклонов изменяется и распределение осадков по территории. Плавный характер такого изменения нарушается влиянием на образование осадков подстилающей поверхности - возвышенностей, крупных водоемов и т.д. В отдельные годы как минимум, так и максимум осадков может быть сдвинут по отношению к среднему на другие месяцы. Изменчивость осадков месячных и годовых сумм, а также сумм за теплый и холодный периоды различна (табл. 6).

Как известно, колебания атмосферных осадков на станциях в противоположность температуре воздуха отличаются большей из-

Т а б л и ц а 6

Коэффициент изменчивости (C_v) и
среднее квадратическое отклонение ($\bar{\sigma}$, мм)
атмосферных осадков за 1936–1973 гг.

Станция	ХI–III		IV–X		За год	
	C_v	$\bar{\sigma}$	C_v	$\bar{\sigma}$	C_v	$\bar{\sigma}$
Тийрикоя	0.27	59	0.20	87	0.15	100
Каргополь	0.32	78	0.20	92	0.19	130
Котлас	0.32	61	0.23	104	0.21	132

менчивостью, что можно объяснить влиянием местных условий на их распределение по территории (рис. 7). В свою очередь, холодный период по изменчивости осадков характеризуется меньшими различиями, чем теплый. Количество осадков за теплый период составляет 65–67% от годовых сумм, а на холодный приходится соответственно 35–33%. Направленность в колебаниях осадков по территории выявить довольно трудно (отклонения осадков одного знака от многолетних по скользящим занимают более продолжительный отрезок времени). Если по температуре воздуха (и абсолютной влажности) аномальные годы или отдельные периоды совпадают на станциях, то для атмосферных осадков нередко наблюдается сдвиг во времени и значительные различия по количеству. Так, по данным ст. Каргополь самым дождливым начиная с 1936 г. был 1966 г. (количество осадков за теплый период близко к средней годовой сумме). По данным ст. Котлас таким оказался 1952 г. (количество осадков за теплый период составило 128% от средней годовой величины). Самое малое количество осадков в районе ст. Каргополь, зафиксированное в 1946 и 1972 гг., явилось результатом их малого количества в теплый период. В районе ст. Котлас сухими можно считать 1936, 1945 и 1949 гг.

Аналогичным путем нетрудно выделить аномалии атмосферных осадков в отдельные периоды года (теплого и холодного). Закономерности изменения количества осадков по долготе выражены нечетко (перекрывающиеся кривые осадков по станциям неоднократно пересекаются). Об этом свидетельствуют и отклонения сумм осадков от средних многолетних за циркуляционные эпохи (табл. 7).

Совместный анализ температуры воздуха и осадков в их многолетнем ходе позволяет дать характеристику общей увлажненности территории и ее изменчивости во времени. Достаточно четко климатические колебания выражает кривая „коэффициента увлажнения”

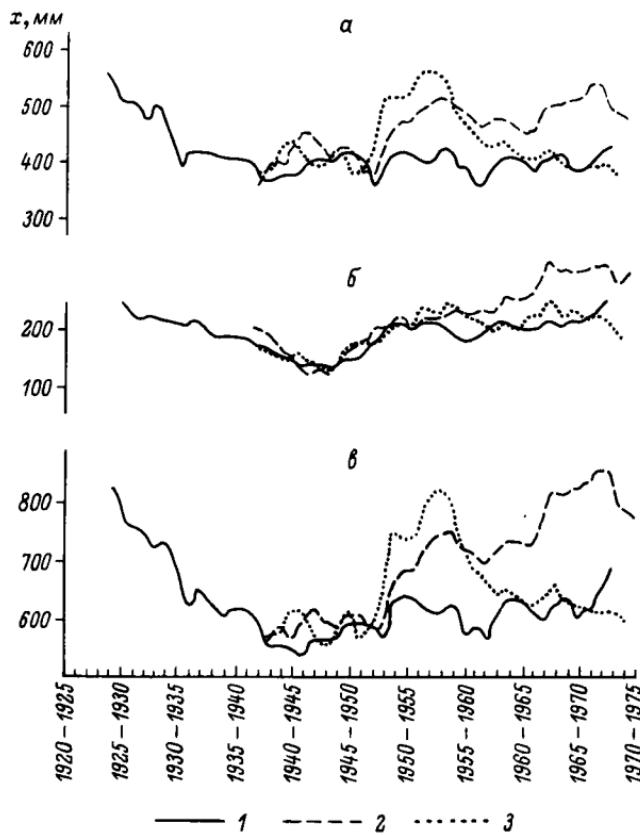


Рис. 7. 6-летние скользящие суммы осадков за теплый (а) и холодный (б) периоды и в целом за год (в) по показаниям станций Тирикоя (1), Каргополь (2), Котлас (3).

(Шнитников, 1961). За исходные для атмосферных осадков принимались их годовые суммы, а для температуры воздуха – сумма месячных температур за май–август, характеризующая некоторые средние условия годового испарения. Для каждого года (1936–1973 гг.) были вычислены условные коэффициенты увлажнения в виде частного от деления годовых сумм осадков на среднюю температуру лета, поскольку, как правило, годам с повышенным количеством осадков отвечают годы с пониженной средней температурой теплых месяцев (У–VIII) и наоборот.

На рис. 8 представлены интегральные кривые коэффициентов увлажнения по станциям Каргополь и Котлас. Сравнение рисунков 7 и 8 показывает, что кривые осадков и коэффициентов увлажнения в общих чертах повторяют друг друга. По отклонениям метеорологических элементов от их средних многолетних значений можно

Т а б л и ц а 7

Отклонения сумм атмосферных осадков (в мм) за эпоху от средней многолетней

Эпоха	Период	Тийрикоя			Каргополь			Котлас		
		XI-III	IV-X	I-XII	XI-III	IV-X	I-XII	XI-III	IV-X	I-XII
E	1929-1939	+3	-10	-10	-	-	-	-	-	-
	1940-1948	-59	-28	-77	-78	-16	-79	-40	-26	-44
	1949-1973	+8	-28	-18	+26	+40	+68	+13	-1	+10
	1949-1963	-2	-22	-23	-1	+33	+34	+12	+30	+46
	1964-1973	+25	-39	-11	+67	+52	+119	+13	-59	-48

Т а б л и ц а 8

Пределы отклонений (в °C) среднемесячных температур воздуха от средних многолетних (ст. Каргополь)

Тип месяца	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Очень холодный	≥ -4.5	≥ -2.8	≥ -2.8	≥ -2.3	≥ -2.4	≥ -3.3
Холодный	от -1.6 до -4.4	от -1.0 до -2.7	от -1.0 до -2.7	от -0.8 до -2.2	от -0.9 до -2.3	от -1.2 до -3.2
Нормальный	±1.5	±0.9	±0.9	±0.7	±0.8	±1.1
Теплый	от +1.6 до +4.4	от +1.0 до +2.7	от +1.0 до +2.7	от +0.8 до +2.2	от +0.9 до +2.3	от +1.2 до +3.2
Очень теплый	≥ +4.5	≥ +2.8	≥ +2.8	≥ +2.3	≥ +2.4	≥ +3.3

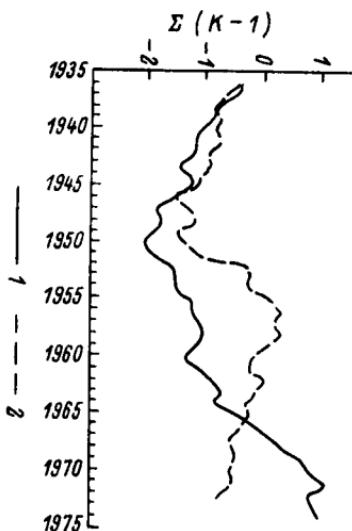


Рис. 8. Интегральные кривые коэффициента увлажнения по показаниям станций Каргополь (1) и Котлас (2) за 1936-1973 гг.

судить об изменчивости условий из года в год. Количественная оценка отдельных периодов (месяца, сезона, года, теплого или холодного периода) в многолетнем ряду произведена по месячным величинам (или их суммам за период) температуры воздуха, влажности, осадков по станциям Каргополь и Котлас.

Отклонения отдельных элементов от среднего многолетнего в зависимости от величины и знака объединены в 5 групп, каждая из которых характеризует определенный тип периода по термическим условиям (и условиям увлажнения): очень холодный (очень сухой), холодный (сухой), нормальный, теплый (влажный), очень теплый (очень влажный). На рис. 9 отчетливо видны аномалии температуры воздуха разного знака и величины за сезоны. Пределы отклонений указанных элементов приняты такими же, как для температуры воздуха (Изотова, 1973): для нормального типа периодов $\pm 20\%$

от максимальных отклонений, для теплого и холодного периодов (соответственно влажного и сухого по осадкам и абсолютной влажности) – от ± 21 до $\pm 60\%$ и для очень теплого и очень холодного периодов (соответственно очень влажного и очень сухого) – более $\pm 60\%$. Принятые пределы отклонений температуры воздуха для отдельных месяцев приведены в табл. 8, а для периодов по температуре воздуха, влажности и осадкам – в табл. 9. С помощью этих величин можно достаточно быстро определить положение любого месяца теплого периода, сезона, года, как прошедшего, так и текущего или прогнозируемого, по их термическим условиям или условиям увлажнения. Так, например, легко установить, что по температуре воздуха очень теплой была осень 1923, 1934, 1938, 1967 гг. и очень холодной – 1885, 1891, 1902, 1941, 1956 гг., очень теплым – лето 1885, 1898, 1913, 1927, 1960 гг. и очень холодным – 1884, 1918, 1923, 1926, 1948, 1950, 1956 гг. и т.д. Руководствуясь такой типализацией, легко определить повторяемость разных периодов, а также положение в многолетнем ряду периода экспедиционных работ на озерах, что будет сделано ниже.

Одним из важных факторов режима озер является ветровой режим, анализ которого в общих чертах произведен по показаниям станций Каргополь, Чарозеро, Коробово.

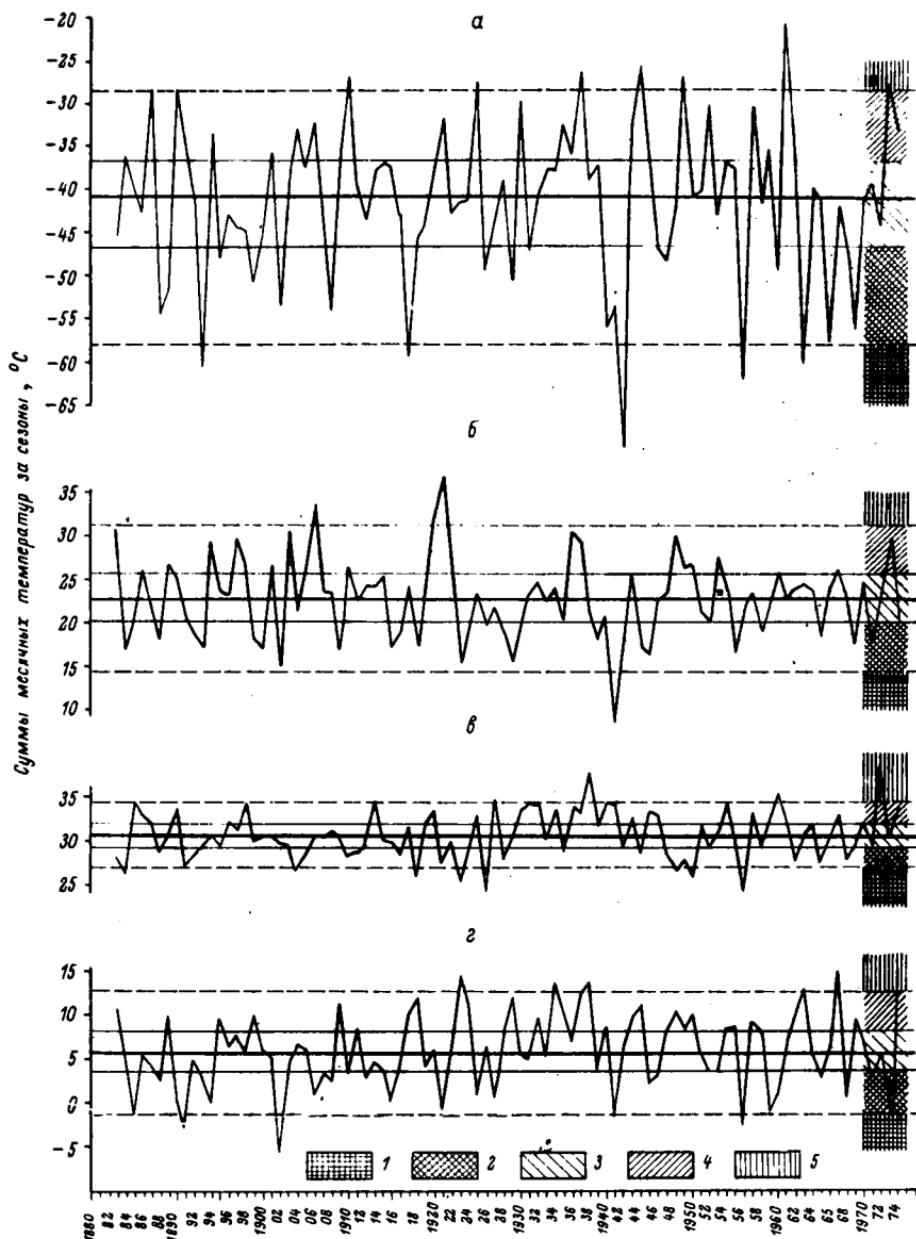


Рис. 9. Суммы месячных температур воздуха за гидрологические сезоны и типы сезонов по показаниям ст. Каргополь.

а - зима (XII, I-III); б - весна (IV-VI); в - лето (VII-III);
г - осень (IX-XI); 1 - очень холодный; 2 - холодный; 3 - нормальный; 4 - теплый; 5 - очень теплый.

Таблица 9

Пределы отклонений сумм метеорологических элементов
от средних многолетних (ст. Каргополь)

Тип периода	Холодный период (XII-III)	Теплый период (IV-X)	За год
Температура воздуха, град.			
Очень холодный	≥ -18.1	≥ -9.5	≥ -2.2
Холодный	От -6.1 до -18.0	От -3.2 до -9.4	От -0.8 до -2.1
Нормальный	От $+3.6$ до -6.0	От $+2.2$ до -3.1	От $+0.4$ до -0.7
Теплый	От $+3.7$ до $+10.9$	От $+2.3$ до $+6.5$	От $+0.5$ до $+1.1$
Очень теплый	$\geq +11.0$	$\geq +6.6$	≥ 1.2
Абсолютная влажность воздуха, мб			
Очень сухой	≥ -3.8	≥ -4.6	≥ -0.7
Сухой	От -1.3 до -3.7	От -1.6 до -4.5	От -0.3 до -0.6
Нормальный	От $+0.8$ до -1.2	От $+1.2$ до -1.5	От $+0.2$ до -0.2
Влажный	От $+0.9$ до $+2.5$	От $+1.3$ до $+3.7$	От $+0.3$ до $+0.5$
Очень влажный	$\geq +2.6$	$\geq +3.8$	$\geq +0.6$
Атмосферные осадки, мм			
Очень сухой	≥ -78	≥ -99	≥ -151
Сухой	От -27 до -77	От -34 до -98	От -51 до -150
Нормальный	От $+41$ до -26	От $+43$ до -33	От $+63$ до -50
Влажный	От $+42$ до $+123$	От $+44$ до $+129$	От $+64$ до $+189$
Очень влажный	$\geq +124$	$\geq +130$	$\geq +190$

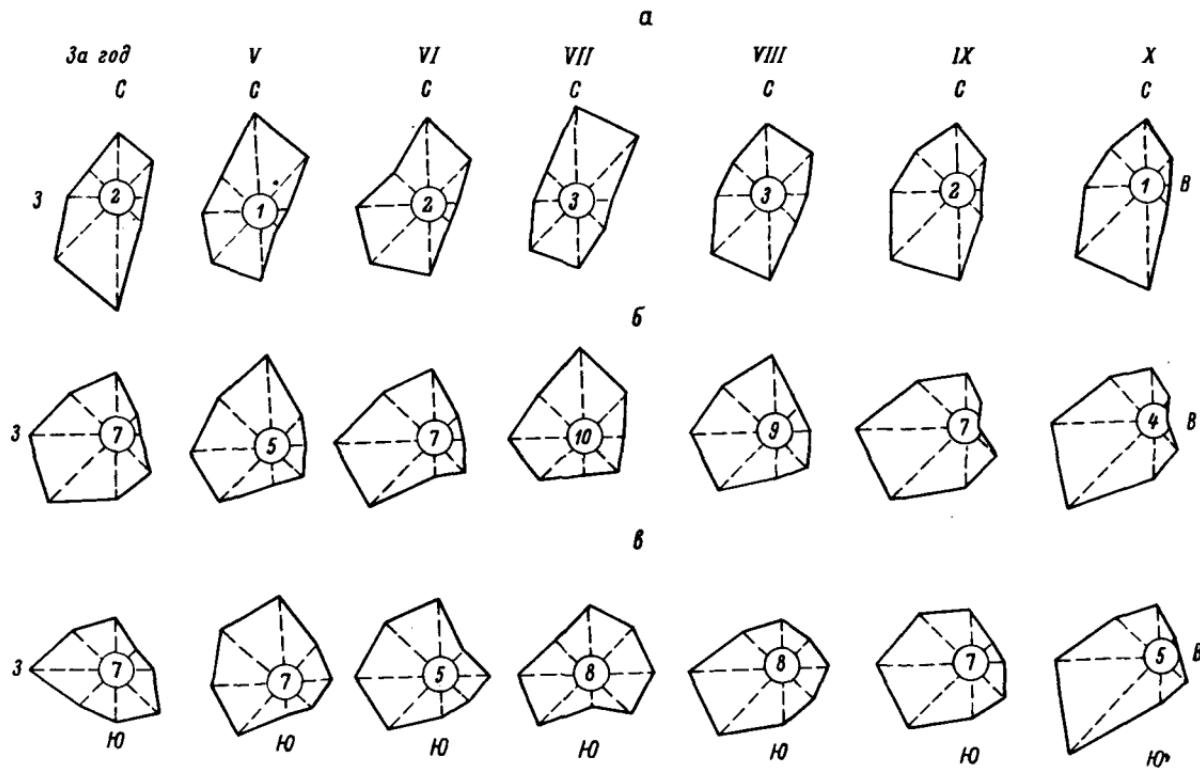
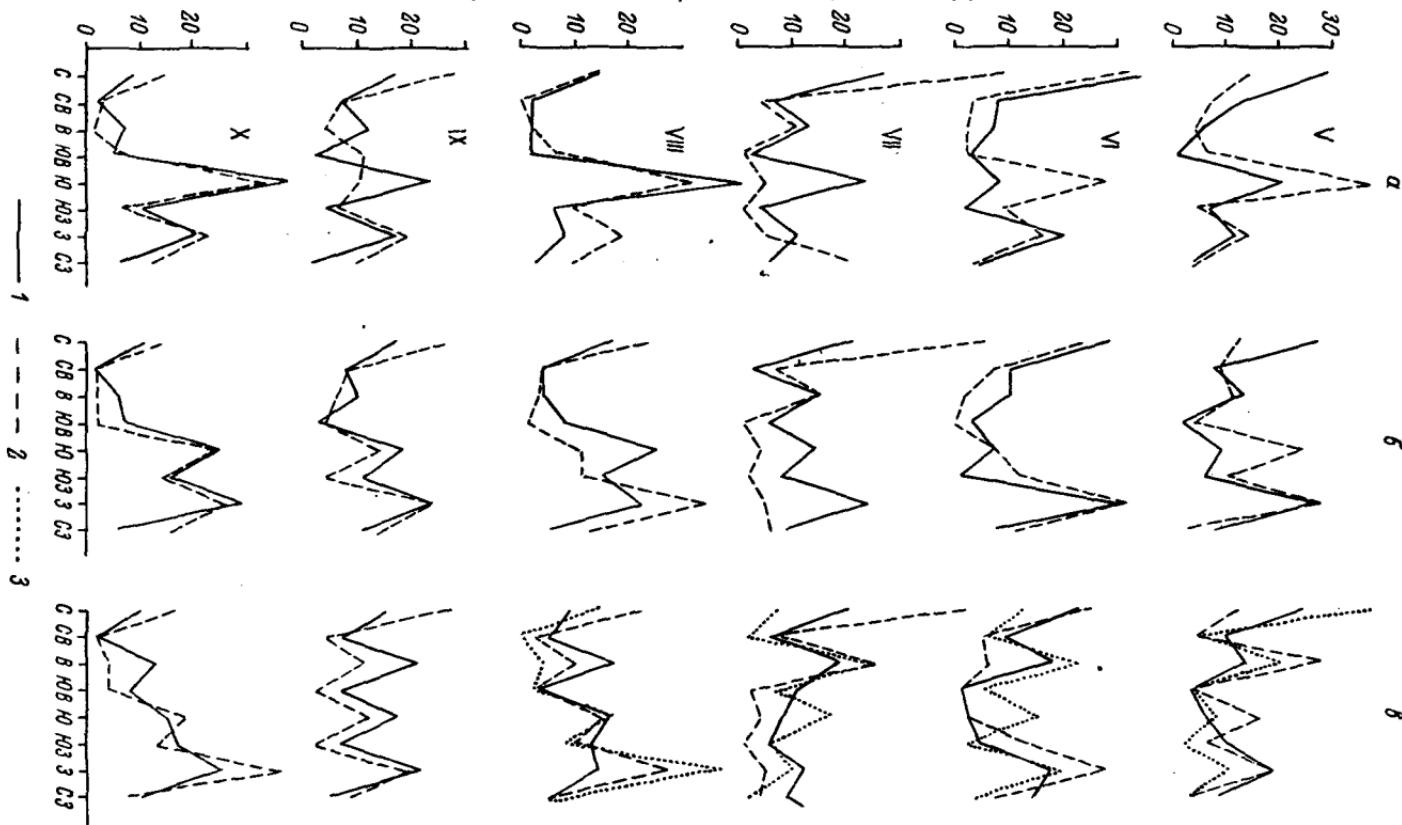


Рис. 10. Повторяемость направлений ветра и штилей за многолетний период по показаниям станций Каргополь (а), Чарозеро (б), Коробово (в).

Масштаб: 1 см – 10% повторяемости. Цифры в центре роз – количество штилей, %.

Повторяемость ветра разных направлений, %



Т а б л и ц а 10

Суммарная повторяемость (в %) ветров
господствующих направлений

Стан- ция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Карго- поль	50	47	40	47	30	32	28	35	39	43	57	51	42
Чар- озеро	39	32	38	40	33	40	29	35	45	48	40	40	38
Коро- бово	42	32	40	42	30	34	31	39	39	50	46	39	39

Т а б л и ц а 11

Средние месячная и годовая скорости ветра (в м/сек.)
за многолетний период

Стан- ция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Карго- поль	4.7	4.6	4.6	4.2	4.4	4.0	3.5	3.3	3.9	4.6	5.0	4.9	4.3
Чаро- зеро	4.6	4.5	4.8	4.3	4.3	3.8	3.3	3.3	4.0	4.6	4.8	4.7	4.2
Коро- бово	5.0	4.7	4.8	4.3	4.6	4.4	4.0	4.0	4.7	5.0	5.1	5.0	4.6

По средним многолетним данным, в районе оз. Лача (ст. Каргополь) преобладающими в году являются ветры южного и юго-западного направления, на оз. Воже (ст. Чарозеро) и оз. Кубенском (ст. Коробово) – западного и юго-западного. Ветры этих направлений господствуют в течение всего года, за исключением мая-августа, когда значительную роль в районе Каргополя играют северные и северо-восточные, а в районах Чарозера и Коробово – северные и северо-западные ветры. Ветры восточного направления наблюдаются редко (5–8% всех случаев). В холодную половину года повсеместно преобладают те же ветры, что и в среднем за год. Несколько большей повторяемостью отличаются ветры южного и юго-восточного направления.

Рис. 11. Развёрнутые розы ветра за май–октябрь по показаниям станций Каргополь (а), Чарозеро (б), Коробово (в).

1 – 1972 г., 2 – 1973 г., 3 – 1974 г.

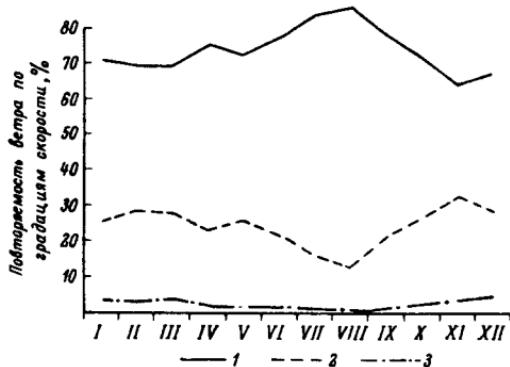


Рис. 12. Повторяемость ветра по градациям скорости за многолетний период по показаниям ст. Каргополь.

1 - 0-5 м/сек.; 2 - 6-11 м/сек.; 3 - более 11 м/сек.

Таблица 12

Наибольшие скорости ветра (в м/сек.) единичной вероятности за конкретный период

Станция	За год	За 5 лет	За 10 лет	За 15 лет	За 20 лет
Каргополь	18	20	21	22	23
Вологда	20	23	24	24	25

В период открытой воды в районе оз. Лача наряду с преобладающими в году увеличивается повторяемость ветра северного и северо-восточного направления (в июле последние являются господствующими), а западные и северо-западные имеют большую повторяемость, чем в холодный период. На озерах Кубенском и Воже повторяемость ветра южного и юго-восточного направлений уменьшается, а остальных направлений (кроме господствующих в году) – увеличивается. Суммарная повторяемость преобладающих в году ветров колеблется в значительных пределах (табл. 10). Розы многолетней повторяемости направлений ветра по названным станциям приведены на рис. 10. В отдельные годы и месяцы повторяемость направлений ветра может быть различной, о чем свидетельствуют развернутые розы повторяемости ветров за годы работы экспедиции (рис. 11). Средние месячные скорости ветра составляют 3-5 м/сек., при этом зимой и в переходные периоды они несколько выше, чем летом (табл. 11).

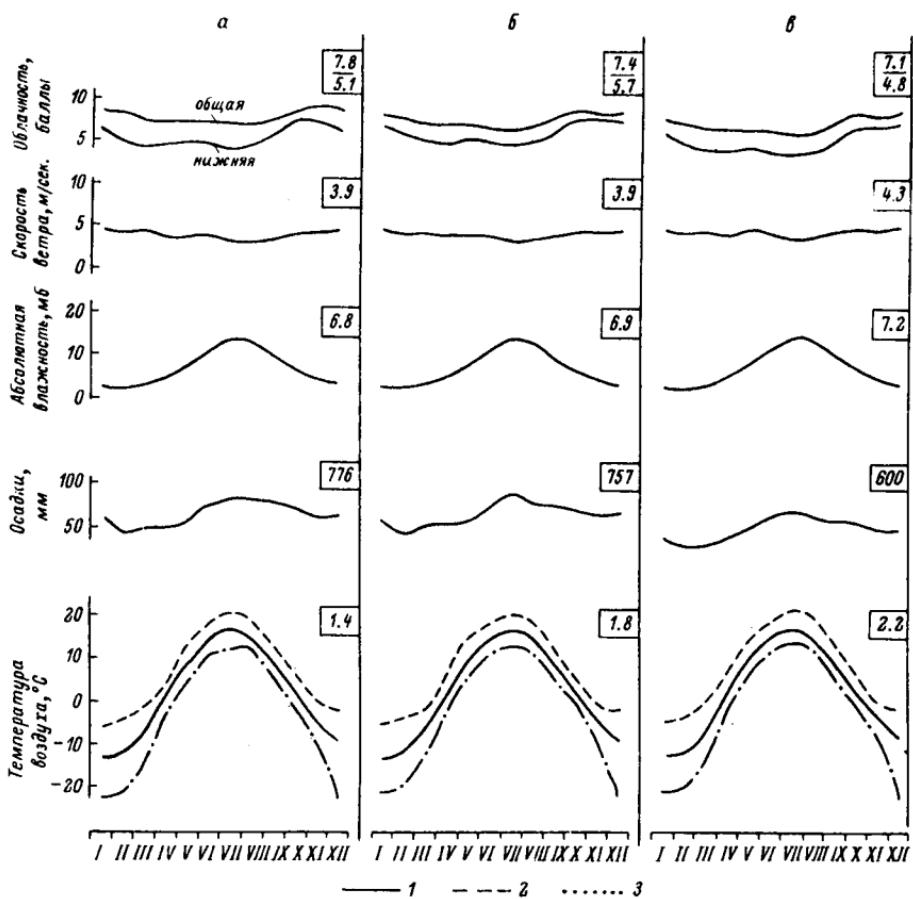


Рис. 13. Комплексный график климатических элементов по показаниям станции Каргополь (а), Чарозеро (б), Коробово (в) за 1951–1973 гг.

1 – средняя месячная величина; 2 – месячный максимум; 3 – месячный минимум. Цифры в прямоугольниках – средние годовые величины элементов.

Господствующими в рассматриваемом районе являются ветры со скоростью 0–5 м/сек. Их повторяемость составляет до 75% за год. Во все месяцы года наблюдаются ветры со скоростью более 11 м/сек., однако их количество в среднем не превышает 5%. Распределение в году ветра различной скорости приведено на рис. 12. В отдельные годы и месяцы повторяемость ветра различной скорости может сильно варьировать. Среднее число дней с сильным ветром (>15 м/сек.) за год составляет в Каргополе – 17, в Чарозере – 6, в Коробово – 4. О величине наибольших скоростей ветра различной вероятности дают представление данные табл. 12.

Характеристика периода 1951-1973 гг.

Для составления климатической характеристики района озер Лача, Воже и Кубенского за период 1951-1973 гг. использованы ежемесячные метеорологические данные станций Каргополь, Чарозеро, Коробово. За основные элементы приняты температура и влажность воздуха, осадки, облачность и ветер, от направления и силы которого зависит интенсивность процессов, протекающих в водоеме и приводном слое воздуха (рис. 13).

Температура воздуха повышается к югу. В районе оз. Кубенского средняя годовая температура на 0.8° (абсолютная влажность на 0.4 мб) выше, чем на оз. Лача. В отдельные месяцы различия в температуре воздуха на этих озерах составляют $0.6-1.2^{\circ}$, при этом наибольшие приходятся на апрель-май. Значительные различия по абсолютной влажности (до 1.0 мб) отмечаются в период май-август, наименьшие - в зимние месяцы. В отдельные годы разница может быть несколько больше. Количество атмосферных осадков уменьшается к югу. Значительное уменьшение их на ст. Коробово объясняется местными факторами, причина которых еще не выяснена.

Различия в скорости ветра в районе озер невелики. По многолетним данным, разница в годовых величинах составляет до 0.4 м/сек., в месячных - не превышает 0.8 м/сек. Наибольшие различия характерны для теплых месяцев (июнь-сентябрь) и составляют 0.6-0.8 м/сек. В месяцы отдельных лет и в среднем за год разница в скорости ветра может значительно превышать среднюю многолетнюю. Величина общей облачности на оз. Кубенском на 0.7 балла ниже, чем в Каргополе. Самые высокие значения нижней облачности отмечены на ст. Чарозеро, что, возможно, связано с большей удаленностью ее от оз. Воже, чем станций Каргополь и Коробово от озер Лача и Кубенского.

О ходе метеоэлементов выбранного периода в сравнении с многолетним можно судить по данным табл. 13. Как свидетельствуют они, годовая температура воздуха по всем станциям на 0.1° ниже многолетней, и на ту же величину меньше абсолютная влажность воздуха. Скорость ветра на 0.3-0.4 м/сек. слабее. Количество атмосферных осадков в районе озер Лача и Воже было больше среднего многолетнего, а на ст. Коробово - меньше. В отдельные месяцы различия по всем элементам возрастили.

Анализ изменений основных метеорологических элементов от года к году и внутри года по территории позволил более детально рассмотреть особенности конкретного периода и выявить размеры (амплитуды) межгодовых колебаний некоторых элементов (табл. 14).

Межгодовые амплитуды отдельных элементов изменяются внутри года в широких пределах; между показаниями станций, за исключением амплитуд осадков, расхождения невелики. Месячные

Таблица 13

Отклонения средних месячных величин метеорологических элементов за 1951–1973 гг.
от средних многолетних

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Температура воздуха, °С													
Каргополь	-0.7	-0.4	-0.2	-0.3	-0.1	+0.2	-0.2	+0.5	-0.2	+0.4	-0.4	+0.3	-0.1
Чароэзеро	-0.5	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1	0.0	-0.4	+0.3	-0.2	+0.4	-0.5	+0.4	-0.1
Коробово	-0.6	-0.9	-0.4	-0.4	0.0	+0.2	-0.4	+0.4	0.0	+0.6	-0.4	+0.5	-0.1
Абсолютная влажность, мб													
Каргополь	-0.1	-0.2	+0.1	0.0	+0.2	-0.3	-0.1	0.0	-0.2	+0.1	-0.3	-0.1	-0.1
Чароэзеро	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	+0.4	-0.2	0.0	-0.1
Коробово	-0.2	-0.1	+0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1	+0.1	-0.1	0.0	-0.1
Скорость ветра, м/сек.													
Каргополь	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.7	-0.2	-0.3	-0.1	-0.5	-0.5	-0.7	-0.5	-0.4
Чароэзеро	-0.3	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.4	-0.6	-0.4	-0.4
Коробово	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.2	-0.6	-0.2	-0.3
Атмосферные осадки, мм													
Каргополь	+7	+4	+7	+12	+6	+6	+9	0	+4	+14	+7	+10	+86
Чароэзеро	-1	-7	-6	+10	+7	+7	+16	-3	+7	+12	-1	-2	+39
Коробово	-15	-15	-12	+4	-1	0	0	-8	-10	+5	-4	-10	-66

Таблица 14

Межгодовые амплитуды метеорологических элементов за 1951-1973 гг.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха, °С												
Каргополь	16.7	17.5	13.8	6.7	9.1	6.8	8.0	6.0	7.7	7.4	9.3	20.4
Чарозеро	15.4	15.6	10.7	6.4	9.6	6.5	7.7	6.5	7.0	6.6	8.7	19.8
Коробово	15.7	16.4	12.9	6.7	8.5	6.7	7.4	6.7	6.7	6.7	8.0	20.4
Абсолютная влажность, мб												
Каргополь	3.0	2.9	3.4	2.4	4.4	4.9	6.5	3.7	4.6	3.6	3.6	4.0
Чарозеро	3.1	2.8	3.0	2.7	3.7	5.4	6.6	3.7	4.1	3.2	2.6	4.0
Коробово	3.1	3.3	2.8	2.5	4.4	5.3	6.3	3.9	4.4	3.2	2.7	4.0
Скорость ветра, м/сек.												
Каргополь	3.2	3.3	4.4	3.5	2.2	3.2	2.3	1.6	2.8	2.7	3.2	2.8
Чарозеро	3.7	2.2	4.0	2.5	2.0	1.8	1.7	1.6	2.3	2.4	2.3	2.6
Коробово	4.0	2.4	3.8	3.1	2.6	1.6	2.3	2.1	2.2	2.9	2.4	3.1
Атмосферные осадки, мм												
Каргополь	77	65	102	114	124	113	155	266	132	123	90	104
Чарозеро	88	93	123	95	109	160	131	174	132	112	134	127
Коробово	57	69	83	108	70	146	107	130	89	82	95	70

Таблица 15

Средние и экстремальные величины метеорологических элементов
за полный цикл увлажненности (1951-1973 гг.)

Станция	Холодный период (XI-III)			Теплый период (IV-X)			За год		
	сред- няя	максималь- ная	минимальная	сред- няя	максималь- ная	минимальная	сред- няя	максималь- ная	минимальная
Температура воздуха, °C									
Каргополь	-9.3	-5.3(1961)	-13.8(1956)	9.1	10.6(1967)	7.8(1971)	1.4	3.0(1957)	-0.5(1966)
Чарозеро	-8.8	-4.8(1961)	-13.1(1950)	9.4	10.7(1967)	8.1(1956)	1.8	3.3(1957)	0.2(1966)
Коробово	-8.6	-4.6(1961)	-13.4(1956)	10.0	11.6(1972)	8.7(1956)	2.2	3.7(1957)	0.4(1969)
Осадки, мм									
Каргополь	277	447(1966)	164(1954)	499	663(1966)	346(1972)	776	1005(1966)	567(1972)
Чарозеро	286	394(1971)	173(1956)	510	670(1966)	298(1972)	796	1046(1966)	556(1972)
Коробово	192	332(1966)	120(1956)	408	545(1966)	276(1972)	600	815(1966)	451(1970)
Скорость ветра, м/сек.									
Каргополь	4.3	5.4(1952)	2.9(1970)	3.6	4.1(1952, 1955)	2.4(1972)	3.9	4.5(1957)	2.7(1972)
Чарозеро	4.2	4.9(1953, 1957)	3.3(1966)	3.6	4.2(1957)	2.7(1972)	3.9	4.5(1957)	3.1(1972)
Коробово	4.5	5.3(1952)	3.6(1956)	4.1	4.8(1952, 1970)	3.5(1959)	4.3	5.4(1966)	3.8(1956, 1959, 1960)

Т а б л и ц а 16

Средние и экстремальные величины метеорологических элементов
в разные фазы водности

Станция	Холодный период (XI-III)			Теплый период (IV-X)			За год		
	сред- няя	максималь- ная	минимальная	сред- няя	максималь- ная	минимальная	сред- няя	максималь- ная	минимальная
Многоводная фаза (1951-1962 гг.)									
Температура воздуха, °C									
Каргополь	-8.8	-5.3(1961)	-9.8(1956)	9.1	10.0(1954)	8.1(1952)	1.6	3.0(1957)	-0.2(1956)
Чароэзеро	-8.3	-4.8(1961)	-9.3(1956)	9.3	10.3(1954)	8.1(1956)	2.0	3.3(1957)	0.3(1956)
Коробово	-8.2	-4.6(1961)	-9.6(1956)	9.9	10.8(1954)	8.7(1956)	2.4	3.7(1957)	0.5(1956)
Осадки, мм									
Каргополь	251	364(1962)	164(1954)	497	590(1952)	414(1960)	748	901(1961)	628(1959)
Чароэзеро	270	381(1955)	173(1956)	529	659(1953)	424(1960)	799	886(1962)	645(1954)
Коробово	171	237(1961)	120(1956)	427	525(1953)	308(1960)	598	684(1952)	498(1954)
Скорость ветра, м/сек.									
Каргополь	4.7	5.4(1952)	4.1(1960)	3.9	4.1(1952, 1955)	3.4(1960)	4.2	4.5(1957)	3.7(1960)
Чароэзеро	4.5	4.9(1953, 1957)	4.0(1960)	3.8	4.2(1957)	3.5(1960)	4.1	4.5(1957)	3.8(1960)
Коробово	4.4	5.3(1952)	4.0(1959)	4.0	4.8(1952)	3.6(1960)	4.2	5.0(1952)	3.8(1956, 1959, 1960)

			М а л о в о д н а я	ф а з а	(1963-1973 гг.)				
Температура воздуха, °С									
Каргополь	-9.9	-6.5(1973)	-9.6(1966)	9.1	10.6(1967)	7.8(1971)	1.2	2.6(1967, 1972)	-0.5(1966)
Чарозеро	-9.1	-6.0(1973)	-8.6(1966)	9.5	10.7(1967, 1972)	8.2(1968, 1971)	1.6	3.2(1972)	0.2(1966)
Коробово	-9.1	-5.7(1973)	-8.6(1969)	10.2	11.6(1972)	9.1(1969)	2.0	3.5(1972)	0.4(1969)
Осадки, мм									
Каргополь	304	447(1966)	214(1967)	501	663(1966)	346(1972)	805	1006(1966)	567(1972)
Чарозеро	304	394(1971)	186(1963)	491	670(1966)	298(1972)	795	1046(1966)	556(1972)
Коробово	214	332(1966)	127(1963)	386	545(1966)	276(1972)	600	815(1966)	451(1970)
Скорость ветра, м/сек.									
Каргополь	3.8	4.6(1965, 1968)	2.9(1970)	3.2	3.9(1966)	2.4(1972)	3.5	4.3(1968)	2.7(1972)
Чарозеро	3.9	4.4(1965)	3.3(1966)	3.4	3.8(1965)	2.7(1972)	3.6	3.9(1964)	3.1(1972)
Коробово	4.6	5.1(1965)	4.0(1966)	4.2	4.8(1970)	3.8(1963, 1972)	4.5	5.4(1966)	4.1(1972)

амплитуды температуры воздуха изменяются в пределах 6.0-20.4°, абсолютной влажности - 2.4-6.6 мб, скорости ветра - 1.6-4.4 м/сек. Максимальные амплитуды температуры относятся к зимним месяцам, а амплитуды абсолютной влажности, наоборот, к летним. У атмосферных осадков и скорости ветра четкой закономерности в изменении амплитуд во времени не наблюдается.

В табл. 15, 16 приведены средние и экстремальные величины некоторых метеорологических элементов по станциям за периоды разной длительности. По средней годовой температуре воздуха к теплым годам следует отнести 1957, 1961 и 1972 гг., к холодным - 1956, 1966 и 1969 гг. Годы с аномальным количеством осадков на станциях практически совпадают. В годы с обильными осадками (1966 г.) количество их было больше среднего многолетнего за теплый период на 29-32, за холодный - на 34-62%. В годы с малым количеством осадков (1972 г.), наоборот, осадков было в теплый период на 28-40, за холодный - на 5-16% меньше средних.

Месяцы периода открытой воды (У-Х) с экстремальными значениями температуры (и абсолютной влажности) воздуха по станциям в большинстве случаев совпадают. По атмосферным осадкам такое совпадение проявляется менее четко. Что же касается года и отдельных его периодов (теплого и холодного), то совпадение аномалий метеорологических элементов на станциях по времени можно считать закономерным.

В периоды разной водности (многоводная фаза - 1951-1962 гг., маловодная - 1963-1973 гг.) различия в годовых величинах температуры воздуха проявляются нечетко, в осадках совсем не выражены. Однако в отдельные периоды года фаз водности наблюдалось существенное перераспределение этих элементов в отношении среднего за 1951-1973 гг. В многоводную фазу было несколько теплее зимой и холоднее летом (влияние W-формы циркуляции), а в маловодную, наоборот, холоднее зимой и теплее летом (действие E-формы). Соответственно и осадков за холодный период многоводной фазы выпадало несколько меньше, в маловодную - больше. В теплое время года осадков было больше в многоводную фазу, чем в маловодную.

М е т е о р о л о г и ч е с к и е у с л о в i я в п e r i o d r a b o t y e k s p e d i c i i (1972-1974 гг.)

Годы экспедиционных работ на оз. Кубенском (1972-1974 гг.) на фоне многолетнего изменения метеорологических элементов относились ко времени преобладания восточного типа циркуляции, особенно в теплый период 1972 г. (76%) и 1974 г. (65%).

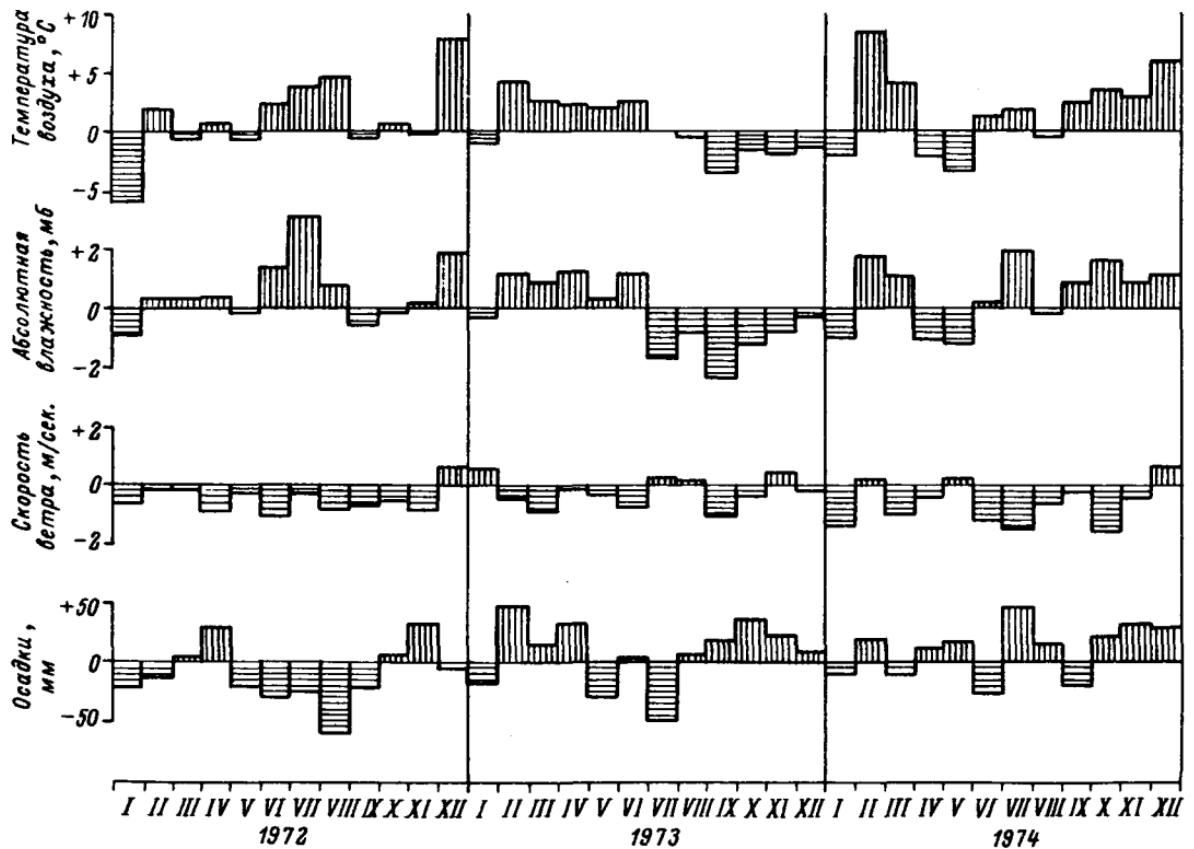


Рис. 14. Отклонения средних месячных величин метеорологических элементов за годы наблюдений от средних за 1951-1973 гг. по показаниям ст. Коробово.

Таблица 17

Повторяемость (в %) средних суточных температур воздуха за годы

Градация температуры, град.	Май			Июнь			1972
	1972	1973	1974	1972	1973	1974	
-5.0-2.6							
-2.5-0.0	6.4		3.2				
0.1-2.5	3.2	3.2	12.9				
2.6-5.0	9.8	3.2	32.2				
5.1-7.5	22.6	3.2	19.4				
7.6-10.0	19.4	25.8	16.1	3.3	3.3	6.7	
10.1-12.5	6.4	32.4	6.5	13.3	6.7	13.3	
12.6-15.0	22.6	12.9	9.7	20.0	10.0	10.0	12.9
15.1-17.5	6.4	16.1		20.0	20.0	30.0	9.7
17.6-20.0	3.2	3.2		13.3	50.0	33.3	16.1
20.1-22.5				23.4	10.0	6.7	29.0
22.6-25.0				6.7			12.9
25.1-27.5							19.4

В разные годы и отдельные месяцы теплого периода преобладал восточный тип циркуляции, а западный и меридиональный либо полностью отсутствовали, либо оказывали ослабленное влияние. Так, W-форма отсутствовала в январе, феврале, июне, августе и сентябре 1972 г., в апреле и ноябре 1974 г., а меридиональная - в июне 1972 г. и в феврале, июне, июле 1974 г.

На рис. 14 приведены отклонения средних месячных величин основных метеорологических элементов от их многолетних значений по ст. Коробово. Аналогичные изменения имели место и по другим станциям района (Чарозеро, Каргополь). Как видно из рисунка, годы исследования оз. Кубенского характеризовались повышенным температурным фоном и ослабленным ветровым режимом. Отдельные месяцы периода открытой воды, представляющие наибольший интерес при исследовании мелководных озер, по термическим условиям были довольно разнообразны - от очень теплых июля и августа 1972 г., июля, сентября и октября 1974 г. до очень холодного сентября 1973 г. Летние месяцы (июнь-август) всех трех лет были теплее нормы или близки к ней, а весенние

работы экспедиции (ст. Коробово)

Июль		Август			Сентябрь			Октябрь	
1973	1974	1972	1973	1974	1972	1973	1974	1972	1973
								3.2	19.4
								6.5	32.3
						20.0		35.5	22.6
					13.3	26.7		38.7	3.2
			12.9		20.0	16.7		16.1	16.1
3.2		3.2	16.1	3.2	30.0	33.3			6.4
9.7		3.2	3.2	12.8	16.7	3.3			
9.7	9.7	3.2	9.7	42.0	20.0				
22.6	19.2	19.4	22.6	42.0					
38.7	35.3	22.6	32.3						
9.7	16.6	29.0							
6.4	19.2	16.2	3.2						
			3.2						

(апрель–май) и осенние (сентябрь–ноябрь) в 1972 г. характеризовались средними условиями; в 1973 г. весна была теплой, а осень холодной; в 1974 г., наоборот, была холодной весна и теплой осень.

Диапазон колебания средней суточной температуры воздуха в период открытой воды (май–октябрь) довольно широк (табл. 17). Наблюдается резкое повышение (до 20°) температуры воздуха в мае (1972, 1973 гг.). В октябре 1973 г. повторяемость средней суточной температуры ниже нуля составила около 52%, а дней с температурой выше +10° за сутки не было ни в 1972, ни в 1973 г. Повторяемость температур определенной величины в одном месяце разных лет колеблется в широком диапазоне. Так, например, повторяемость средней суточной температуры выше +15° (ст. Коробово) в июне 1972 г. составила 63%, 1973 г. – 80%, 1974 г. – 70%; в июле – соответственно 87, 77, 90%, а в августе – 90, 58, 42%.

Таковы в общих чертах закономерности изменения метеорологических элементов в районе озер Лача, Воже и Кубенского за последний цикл увлажненности на фоне многолетних колебаний.

ВОДНЫЙ БАЛАНС И УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ОЗ. КУБЕНСКОГО

3.1. Водный режим рек - притоков

Условия формирования стока рек

Водосборный бассейн оз. Кубенского расположен на юго-западной окраине обширного Северного Края. Занимаемая им территория площадью 14440 км² представляет собой залесенную холмистую равнину и характеризуется избыточным увлажнением, обеспечивающим в сочетании с местными природными условиями повышенный поверхностный сток рек. Водный режим рек отличается хорошо выраженным довольно высоким весенним половодьем, летними и осенними паводками, довольно продолжительной меженью, устойчивым ледоставом. Основное питание рек осуществляется поверхностными водами преимущественно от таяния снегов (75-78%) и дождей (11-18%) и в меньшей степени грунтовыми водами (7-11%).

В оз. Кубенское впадает 9 притоков длиной более 10 км и несколько десятков речек и ручьев меньших размеров (рис. 15). Самый крупный и многоводный приток озера - р. Кубена - втекает с юго-восточного берега, образуя в устье дельту с многочисленными рукавами. Длина реки - 368 км, площадь водосбора - 11000 км², около 80% которого занято лесами, заболоченность - 3%, озерность - менее 1%, средний годовой расход воды, рассчитанный для устья, - 100 м³/сек. Наиболее значительные притоки р. Кубены, впадающие в ее среднем течении, - реки Сямжена (длина 108 км, площадь водосбора 1938 км²) и Сить (длина 85 км, площадь водосбора 1837 км²). Значительно уступает р. Кубене второй по величине приток Кубенского озера - р. Уфтуога. Длина ее - 117 км, площадь водосборного бассейна - 1280 км², средний годовой расход воды, приведенный к устью, - 11.6 м³/сек.

К северным притокам озера относится р. Порозовица - одно из звеньев Северо-Двинского водного пути. Ее протяженность - 34 км, площадь бассейна - около 980 км²: на ней расположены два шлюза, регулирующие сток для нужд судоходства. Из-за слабого уклона русла (0,16 м/км) нижний почти 10-километровый участок реки находится в подпоре от оз. Кубенского. Западные притоки озера невелики, и наиболее многоводная среди них - р. Большой Ельма длиной 60 км и площадью водосбора 338 км² (табл. 18). Из юго-восточной части озера вытекает р. Сухона - левый приток Сев. Двины.

Т а б л и ц а 18

Основные гидрографические характеристики притоков оз. Кубенского

Река	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Oзерность	Заболоченность	Лесистость
			%		
Кубена	368	11000 *	1 *	3 *	86 *
Уфтиуга	117	1280 *	1 *	3 *	63 *
Порозовица	27	980	3	2	76
Большая Ельма	60	338	0	0	62
Еда	21	106	0	2	98
Шуя	17	46.3	0	0	44
Водла	16	31.8	0	0	38
Дмитровка	13	42.3	0	0	43
Делялевка	11	28.7	0	0	69
Пучка	9	46.0	0	7	54
Кой	8	54.0	0	2	.70
Малая Ельма	6	14.0	0	0	22
Межбассейно- ый водо- сбор:					
западное по- бережье	-	190	0	1	47
восточное по- бережье	-	283	0	9	74
Общий водосбор озера	-	14440	1	3	81

П р и м е ч а н и е. Данные, отмеченные звездочкой, заимствованы из справочника „Гидрологическая изученность“ (т. 3, Л., 1965).

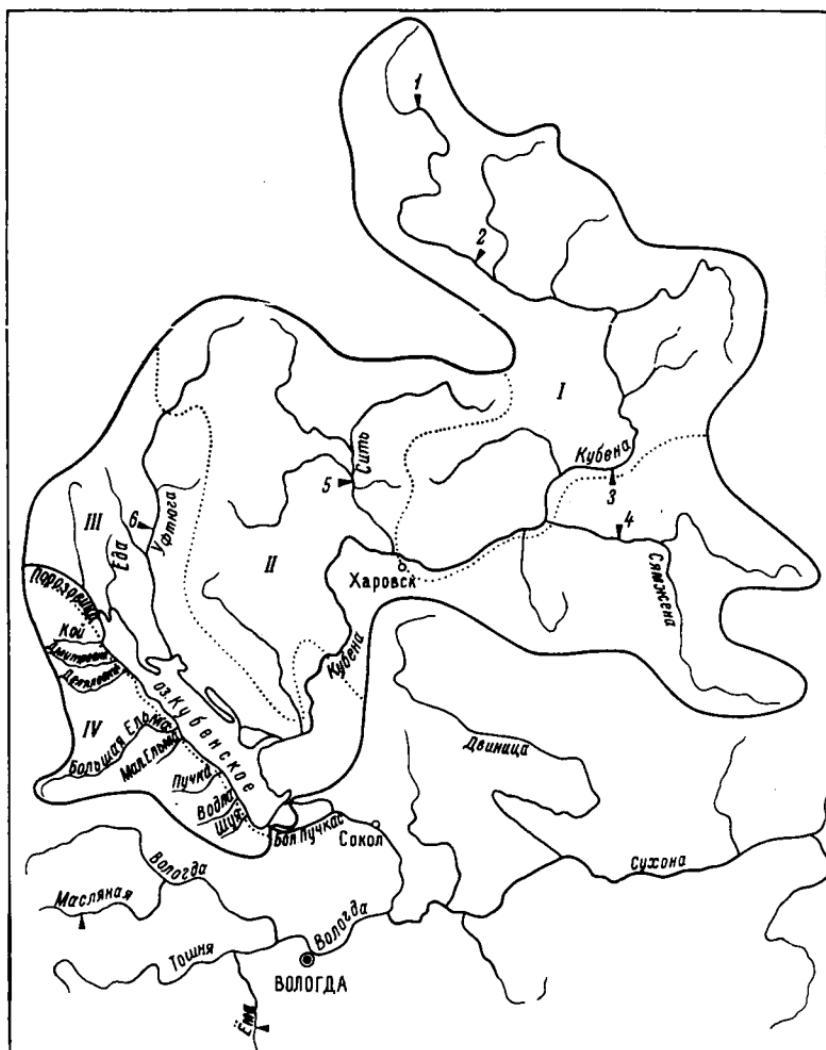


Рис. 15. Гидрологические районы бассейна озера, по Р.А. Филиппенко (1966).

1–6 – посты наблюдений.

Расположение притоков по периметру озера обусловило значительную асимметричность его водосборного бассейна. Часть бассейна, примыкающая к восточному побережью на пространстве от Порозовицы до Сухоны, составляет 88% от всей площади водосбора, 7% приходится на Порозовицу и остальные 5% – на западные притоки и междуречья.

Между восточным и западным водосборами существуют некоторые различия и в характере подстилающей поверхности, оказывавшей влияние на формирование стока рек и его внутригодовое распределение. Территория водосборного бассейна оз. Кубенского охватывает несколько районов, входящих в схему общего гидрологического районирования, разработанную Р.А. Филенко для рек Вологодской области по целому ряду признаков, в том числе морфологии водосборов, источникам питания, изменчивости стока, эрозионной деятельности и др. (Филенко, 1963, 1966).

Самый отдаленный от озера район – Воже-Кубенский, охватывающий обширный участок и питающий верхнюю и значительную часть средней Кубены, – представляет собой приподнятую, относительно глубоко расчлененную холмистую равнину,ложенную суглинком. Леса здесь занимают 70–80% площади, болота развиты слабо (показатель заболоченности – 2%) и приурочены в основном к понижениям между холмами. Годовая сумма осадков составляет 750–800 мм. Территория хорошо дренируется густой (0.40–0.50 км/км²) речной сетью и отличается повышенным годовым модулем стока – 9.5–9.9 л/сек.·км² (рис. 15).

Второй гидрологический район – Прикубенский – включает водосборы основных притоков р. Кубены, впадающих в ее среднем участке, – Сити и Сямжены и верхнее течение р. Уфтуги. Он характеризуется более плоским рельефом, менее густой речной сетью (0.35 км/км²), средним дренированием поверхности, развитием суходольных болот и небольших проточных озер. Среди пород, слагающих местность, распространены слабо завалуненные моренные суглинки и безвалунные пески, супеси и суглинки озерно-ледникового происхождения. Средний годовой модуль стока на большей части района составляет в среднем 9.1 л/сек.·км². Уменьшение модуля годового стока рек в данном районе, вероятно, связано не только с некоторыми изменениями условий его формирования, в частности ослаблением дренирования поверхностных и грунтовых вод, но и с общим понижением местности (Стеблин-Каменская, 1962). Эта особенность весьма характерна для Северного Края, где зависимость стока рек от высоты водосборных бассейнов более тесная, чем зависимость от их площади (Ресурсы..., 1972).

Третий район является частью обширного Воже-Кубено-Сухонского района, приуроченного к доледниковой впадине. Он охватывает водосборы, относящиеся к среднему и нижнему течению р. Уфтуги, низовьям р. Кубены, мелким притокам их междуречья, и узкой полосой проходит вдоль западного побережья. Рельеф представляет собой плоскую слабо дренированную озерную равнину с за-

медленным стоком и слабым оттоком грунтовых вод. Количество годовых осадков снижается до 750 мм. Среди подстилающих пород преобладают суглинки, пылеватые супеси, пески. Характерно развитие площадей длительного избыточного увлажнения. Значительно возрастает заболоченность. На частном водосборе вдоль восточного побережья оз. Кубенского она достигает 9%.

Западный водосборный бассейн озера входит в состав Вологдо-Комельского гидрологического района, занимая его северо-восточную окраину (рис. 15). Местность представляет собой широко волнистую хорошо дренированную равнину с густой (0.40 – 0.50 км/ км^2) сетью небольших речек, ручьев и балок. Большинство водосборов западных притоков сложено безвалунными суглинками, реже супесями, почти лишено болот. По сравнению с остальной частью бассейна озера западный водосбор отличается худшими условиями увлажнения (годовые осадки составляют 660 мм), меньшей залесенностью (55%) и значительным распространением сельскохозяйственных угодий (44%). Средний годовой модуль стока для большинства западных притоков оз. Кубенского по аналогии с соседними малыми реками, имеющими сходные гидрографические и морфометрические показатели водосборов, принят равным $8.3 \text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$. В целом для водосборного бассейна озера средний многолетний модуль годового стока, отнесенный к периоду 1951–1973 гг., равен $9.0 \text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$. Его значения по территории бассейна изменяются от $11.6 \text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$ в верховьях р. Кубены (разъезд Перхино) до $8.7 \text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$ на р. Сямжене (д. Сямжа), ее левом притоке.

Несмотря на некоторые различия в природных особенностях отдельных районов водосборного бассейна оз. Кубенского, характер дренирования его территории реками довольно однообразен. В силу того, что местная речная сеть сформировалась в послеледниковый период, глубина ее эрозионного вреза относительно мала. Даже наиболее крупная из рек – Кубена – не прорезает всей толщи четвертичных отложений. Основную роль в грунтовом питании рек играют порово-пластовые воды верхних горизонтов. На большей части водосборов рек Кубены и Уфтуги и притоков западного побережья водоносными являются песчаные прослои, залегающие среди валунных суглинков и глин на глубине 1–2 м, водообильность их обычно незначительная. Междууречье Порозовицы и Уфтуги выстилают озерно-ледниковые песчаные отложения с малым содержанием влаги. Малые притоки, впадающие с юго-западного побережья, дренируют озерно-ледниковые и водно-ледниковые отложения, представленные пылеватыми лёссовидными суглинками и супесями слабой водообильности (Ганова, 1969).

Коренные породы, слагающие водосборный бассейн оз. Кубенского, относятся к пермскому времени и представлены отложениями казанского и татарского ярусов. Отложения казанского яруса, приуроченные к северной и северо-западной частям водосбора озера (реки Порозовица, Еда, верховья рек Кубены и Уфтуги), состоят в основном из известняков, доломитов с прослоями мергелей, глин

и песчаников. Породы казанского яруса отличаются неравномерной, часто значительной водообильностью, содержат как свободные, так и напорные воды пластово-трещинного типа (Пахтусова, 1969; Буслаева, Федотова, 1969).

Татарский ярус пермских отложений состоит из двух горизонтов. Нижнеустьинский горизонт развит на территории, охватывающей правобережье р. Кубены, низовья р. Уфтиюги и водосборы малых притоков, впадающих с северо-западного побережья озера. Он сложен в основном песчано-алевролитовыми породами с прослойями глин и мергелей и отличается неравномерной, часто весьма значительной водообильностью. Бассейн озера в междуречье Кубены и Сухоны и на большей части западного побережья сложен преимущественно доломитами и мергелями с прослойями глин и песков, входящими в состав сухонского горизонта татарского яруса. Подземные воды приурочены к мергелям, доломитам и прослойям песка и относятся к пластово-трещинным водам. Разгрузка вод пермских отложений происходит по тектоническим трещинам в виде восходящих источников.

Слабая водообильность четвертичных отложений, представленных на большей части территории суглинками, и глубокое залегание водоносных горизонтов коренных пород обусловили незначительную долю подземных вод в питании рек района. Модуль подземного стока на водосборе озера составляет около 1.0 л/сек.км^2 , относясь к числу минимальных его показателей для территории Северного Края (Попов, Субсч, 1969).

Характеристика расчетного периода

Среди притоков оз. Кубенского в гидрологическом отношении наиболее хорошо изучена р. Кубена, на долю которой приходится 77% объема поступающих в него речных вод. Наблюдения за водным режимом реки ведутся в пяти пунктах, три из которых расположены на самой Кубене и два на ее притоках – Сити и Сямжене (табл. 19). Самый длинный ряд наблюдений (с 1936 г.) имеется по посту в с. Троице-Енальское, находящемся в 258 км от устья р. Кубены. В 1951 г. начались систематические измерения расходов воды в среднем течении р. Кубены – в створе у д. Кубинской, а в 1963–1965 гг. – на реках Сити и Сямжене, что позволило с 1966 г. учитывать сток с 74% площади водосбора главного притока озера. С 1951 г. имеются сведения о водном режиме р. Уфтиюги; остальные притоки озера не изучались.

Существующая в настоящее время гидрометрическая сеть отражает режим поверхностного притока воды в оз. Кубенское с 60% площади его водосборного бассейна; территория, расположенная ниже замыкающих створов рек, составляет 25%. Среди неизученных притоков наиболее значительные – это Порозовица, Бол. Ельма и Еда, на долю которых приходится 10% площади, а остальные

Т а б л и ц а 19

Пункты гидрологических наблюдений
в бассейне оз. Кубенского

Река, пункт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений
Кубена, рэд Перхино	351	64	с 1953
Кубена, с. Троице-Енальское	258	1110	с 1936
Кубена, д. Кубинская	146	4860	с 1951
Сямжена, д. Сямжа	21	1700	с 1963
Сить, д. Козлиха	21	1540	с 1965
Уфтуога, д. Маланьевская	46	618	с 1951
Сухона, д. Рабаньга	33	15500	с 1877
	от истока		

5% – на малые реки, ручьи и межбассейновые пространства. С 1877 г. производятся наблюдения над стоком из оз. Кубенского в створе у д. Рабаньга, расположенным в 33 км от истока р. Сухоны.

Ввиду того, что сведения о режиме главных притоков озера в основном относятся к 1951–1973 гг., и во избежание нецелесообразного удлинения рядов пришлось ограничиться этим более коротким периодом для получения гидрологических характеристик стока рек и расчета поверхностного притока в озеро при составлении его водного баланса. Для определения положения расчетного периода в многолетнем ряду были построены разностные интегральные кривые модульных коэффициентов годового стока р. Сухоны (д. Рабаньга) по данным с 1880 г. и рек Кубены (д. Кубинская) и Уфтуоги (д. Маланьевская) с 1951 г. Коэффициент вариации, равный для трех постов 0.28–0.35, в расчеты интегральной кривой не вводился. Судя по графикам, колебания годового стока рек в бассейне оз. Кубенского происходили довольно синхронно с заметным чередованием групп многоводных и маловодных лет (рис. 16). На кривой, отражающей период с 1880 по 1973 г., четко прослеживаются выделенные по точкам перелома два цикла внутривековой изменчивости стока р. Сухоны: один – с 1898 по 1950 г. и второй – с 1951 по 1973 г. Каждый из циклов колебания годового стока включает многоводную и маловодную фазы, имеющие различную продолжительность. Представление о водности различных фаз могут дать рассчитанные для них средние модульные коэффициенты $K_{ср}$ (Кузин, 1970).

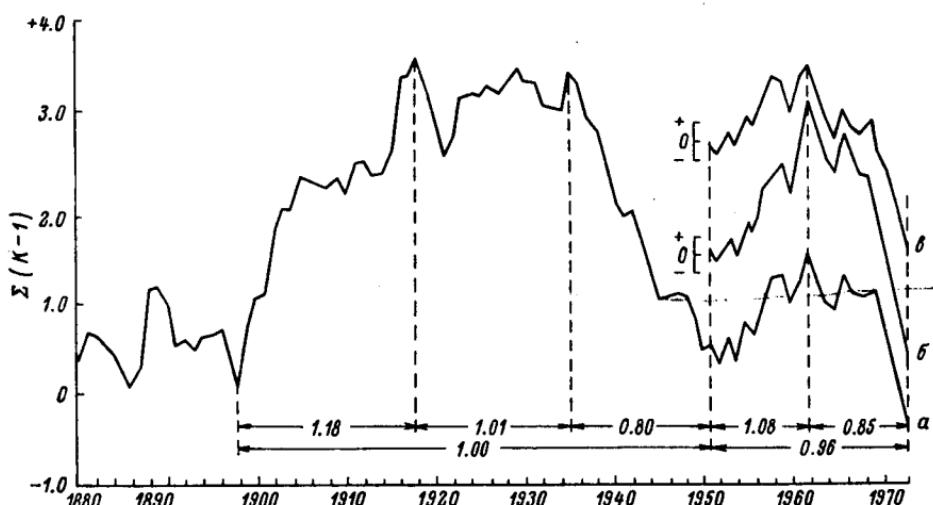


Рис. 16. Интегральные кривые модульных коэффициентов годового стока рек.

а – р. Сухона (д. Рабаньга); б – р. Уфтуя (д. Маланьевская); в – р. Кубена (д. Кубинская).

В первом цикле выделяется многоводная фаза, длившаяся с 1898 по 1918 г., которая характеризуется средней водностью на 18% выше нормы ($K_{ср} = 1.18$), затем фаза с 1919 по 1935 г. со стоком, близким к норме ($K_{ср} = 1.01$), и маловодная фаза 1936–1950 гг., средняя водность которой была на 20% ниже нормы ($K_{ср} = 0.80$). Второй цикл колебания увлажненности приходится на 1951–1973 гг., в котором многоводная фаза охватывает период с 1951 по 1962 г. ($K_{ср} = 1.08$), а маловодная – с 1963 по 1973 г. ($K_{ср} = 0.85$). Аналогичные колебания годового стока в последние два десятилетия имели место и на реках Кубене и Уфтуя, в режиме которых хорошо выделяются многоводная (1951–1962 гг.) и маловодная (1963–1973 гг.) фазы.

В отличие от предыдущего современный цикл колебаний водности в бассейне оз. Кубенского характеризуется относительно большими потерями влаги как в маловодную, так и в многоводную фазы. На примере р. Сухоны (д. Рабаньга) видно, что если в прежнем цикле сток рек увеличивался в многоводную фазу и уменьшался в маловодную приблизительно на равную величину ($\pm 18\text{--}20\%$), то в современном цикле в соответствующие фазы водности он увеличился всего на 8%, а сократился на 15% по сравнению с нормой стока реки, выведенной для 94-летнего ряда наблюдений. Коэффициент вариации годового стока рек за расчетный период составил 0.28 для р. Кубены (д. Кубинская), 0.35 для р. Уфтуя (д. Маланьевская) и 0.30 для р. Сухоны (д. Рабаньга) при зна-

Т а б л и ц а 20

Распределение (в %) сезонного стока рек
в многоводную (1951-1962 гг. - числитель) и
маловодную (1963-1973 гг. - знаменатель) фазы

Река, пункт	Весна	Лето	Осень	Зима
Кубена, с. Троице-Еналь-ское	<u>65.6</u>	<u>10.7</u>	<u>18.6</u>	<u>5.1</u>
	73.0	4.0	16.4	6.6
Кубена, д. Кубинская	<u>67.3</u>	<u>10.1</u>	<u>17.9</u>	<u>4.7</u>
	72.9	5.1	14.8	7.2
Уфтуога, д. Маланьевская	<u>72.6</u>	<u>7.7</u>	<u>16.3</u>	<u>3.4</u>
	78.8	2.8	13.3	5.1
Сухона, д. Рабаньга	<u>41.0</u>	<u>21.1</u>	<u>25.9</u>	<u>12.0</u>
	42.0	19.4	24.6	14.0

чении его за 94-летний период, равном для данной реки 0.29.

Анализ изменения годового стока рек Кубены и Уфтуоги показал, что в многоводную фазу 5 из 12 лет имели обеспеченность в пределах 4-25%, 6 лет были со средней водностью (обеспеченность 29-58%) и один год был маловодным (75% обеспеченности). В маловодную фазу обеспеченность годового стока распределялась следующим образом: 5 лет были маловодными (75-99%), 5 лет со средней водностью (50-75%) и 1 год имел обеспеченность стока около 8%.

Различия между фазами проявляются не только в изменении водности рек, но и в особенностях внутригодового распределения их стока, связанных с метеорологическими условиями (табл. 20). Для многоводной фазы 1951-1962 гг. характерно заметное преобладание W-формы циркуляции, особенно в теплое время года, приведшее к значительному увеличению осадков и усилинию дождевых паводков (гл. 2, наст. изд.). Несмотря на преобладание E-формы в холодный период, благоприятное сочетание W- и C-воздушных масс обусловило высокие половодья на реках. Этим годам свойственна повышенная водность не только по средним за 12-летний ряд наблюдений данным, но и значительное преобладание лет с весенним стоком, превосходящим многолетнюю его величину. Сравнение по фазам, сделанное на материале по стоку рек Кубены (д. Кубинская) и Уфтуоги (д. Маланьевская), показало, что в многоводную фазу 9 лет из 12 имели средний месячный максимальный сток за весну выше многолетней величины. В мае 1961 г. средний месячный расход р. Кубены достигал максимального зна-

чения, равного 480 м³/сек., что более чем в 2 раза превышало его среднюю характеристику.

Годы, составляющие многоводную фазу, отличаются более высоким половодьем. Средний расход воды во время пика половодья в 1951–1962 гг. составлял на р. Кубене (д. Кубинская) – 685 м³/сек., на р. Уфтиюге (д. Маланьевская) – 123 м³/сек., в то время как в маловодную фазу максимальный сток в период снеготаяния в среднем был соответственно равен 460 и 85.6 м³/сек. То же относится и к осеннему периоду, характеризующемуся значительным в течение 8 лет преобладанием высоких дождевых паводков. Особенно высокими они были в 1957 г., когда средний месячный расход р. Кубены (д. Кубинская) в октябре составил 111 м³/сек., а в 1952 г. за этот же месяц – 89.3 м³/сек., при среднем за цикл значении, равном 40.4 м³/сек. Минимальный сток рек по средним месячным данным за период с июля по ноябрь оказался сравнительно высок: на р. Кубене (д. Кубинская) – 12.9 м³/сек., на р. Уфтиюге (д. Маланьевская) – 1.14 м³/сек. В целом для режима рек в многоводную фазу характерно некоторое понижение доли половодья и увеличение осенного стока по сравнению с межсезонным распределением за цикл.

Маловодная фаза 1963–1973 гг. включает годы с развитием Е-формы циркуляции в теплую половину года и ослаблением переноса западных воздушных масс. По сравнению с многоводной фазой отмечалось повышение осадков в холодное время и уменьшение их в теплый период. Водность рек в среднем за маловодную фазу была меньше как за счет сокращения их стока, так и в связи с уменьшением числа лет, в которые сток рек за отдельные сезоны превышал бы средние многолетние величины. Для времена половодья только в 3–5 случаях и для осенних паводков – в 3 из 11 возможных, составляющих число лет фазы, средние месячные максимальные расходы воды были выше своих многолетних показателей.

Средние значения максимальных расходов воды в период весеннего половодья снизились до 460 м³/сек. на р. Кубене (д. Кубинская) и до 85.6 м³/сек. на р. Уфтиюге (д. Маланьевская). Особенно заметно маловодность рек проявилась в летне-осеннюю межень, во время которой минимальный сток в среднем сократился почти в 2 раза по сравнению с аналогичным показателем в многоводную фазу. На р. Кубене (д. Кубинская) эта величина снизилась до 6.48 м³/сек., на р. Уфтиюге (д. Маланьевская) – до 0.41 м³/сек. В маловодную фазу, когда следующие друг за другом годы характеризуются пониженной водностью летне-осеннего периода, доля весеннего стока несколько возрастает.

Отмеченные особенности внутригодового распределения стока рек обусловлены целым рядом метеорологических и других природных факторов, но в первую очередь характером выпадения осадков, в многоводную фазу преобладающих среднюю многолетнюю величину в теплое, а в маловодную – в холодное время года.

Т а б л и ц а 21

Средний годовой сток рек (в м³/сек.)
за различные фазы увлажненности

Река, пункт	Маловодная фаза (1936-1950 гг.)	Многоводная фаза (1951-1962 гг.)	Маловодная фаза (1963-1973 гг.)	Полный цикл увлажненности (1951-1973 гг.)
Кубена, с. Троице- Енальское	8.76	12.7	9.64	11.3
Сухона, д. Рабань- га	110	150	115	133

Представляется интересным сравнить особенности формирования стока в маловодную фазу 1963-1973 гг., на которую приходятся годы работы Вологодско-Архангельской экспедиции, с маловодной фазой предшествующего цикла, ограниченной 1936-1950 гг. На средние значения метеорологических и гидрологических характеристик предшествующей фазы определяющее влияние оказала эпоха развития С -формы циркуляции, господствующей в 1940-1948 гг. Преобладание Е -формы в холодный период года и переход от Е к С -циркуляции в теплое время в совокупности привело к уменьшению стока рек за 1936-1950 гг. в среднем почти на 20% по сравнению с нормой (табл. 21).

Несмотря на то что водность рек в последнюю из маловодных фаз несколько выше, чем в прошедшую, можно отметить, что формирование стока рек в 1963-1973 гг. проходило в менее благоприятных условиях. Эти годы относятся к эпохе развития Е -формы циркуляции, которая с 1964 г. отмечалась во все месяцы и что привело к уменьшению осадков и повышению температуры воздуха в теплое время и в конечном итоге – частой повторяемости маловодных лет. Особенно заметно различие в метеорологических условиях обеих фаз при сравнении отдельных сезонов. Если в эпоху развития С -формы циркуляции средние осадки и температура воздуха по ст. Котлас за лето составляли соответственно 60 мм и 15.7°, а за осень – 40 мм и 1.9°, то в последнюю маловодную фазу имело место некоторое перераспределение этих показателей: осадки и температура воздуха в летнее время были равны 52 мм и 16.2°, а осенью – 48 мм и 1.5°.

Такое изменение метеорологической обстановки сказалось на внутригодовом распределении стока рек, которое хоть и сохранило свис особенности, присущие маловодной фазе, но приобрело

несколько иное цифровое выражение. Как показывают данные наблюдений, распределение стока р. Кубены (с. Троице-Енальское) в 1936–1950 гг. было следующим: весна – 73.2%, лето – 5.8%, осень – 15.9%, зима – 5.1%, а в 1963–1973 гг. – соответственно 72.2, 4.3, 17.0 и 6.5%. Отличия в режиме рек в эти фазы проявились и в других характеристиках стока. Средний максимальный расход воды в половодье в предшествующую маловодную fazu был равен $147 \text{ м}^3/\text{сек.}$, в последнюю – $142 \text{ м}^3/\text{сек.}$, в летне-осеннюю межень – соответственно 1.88 и $1.30 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Сокращение доли половодья и летнего стока за счет увеличения стока в осенний и зимний период отмечается и по данным поста в верховьях р. Сухоны (д. Рабаньга), несмотря на искусственное регулирование стока из оз. Кубенского.

Внутригодовое распределение стока рек

Годовой сток исследуемых притоков оз. Кубенского испытывает сравнительно небольшие колебания. Соотношение наибольших и наименьших средних годовых расходов воды составляет для р. Кубены 2.5, для р. Уфтуги – 3.5, коэффициенты вариации – соответственно 0.28 и 0.35. На протяжении последних 23 лет годовой сток р. Кубены (д. Кубинская) изменялся от 27.4 (1973 г., $p = 96\%$) до $68.6 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (1961 и 1966 г., $p = 4-8\%$), а сток р. Уфтуги – от 3.13 (1973 г., $p = 96\%$) до $10.6 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (1961 г., $p = 4.2\%$).

Водосборный бассейн оз. Кубенского по особенностям формирования сезонного стока относится к Южнотаежному району Северного Края, характеризующемуся наибольшей неравномерностью распределения стока рек в течение года (Ресурсы..., 1972). Помимо климатических условий на режим рек оказывает влияние сравнительно меньшая залесенность водосборных бассейнов местных рек по сравнению с таежными районами. По средним многолетним данным, весенний сток р. Кубены (д. Кубинская), у которой показатель лесистости равен 90%, составляет 70% годового, летне-осенний – 24% и зимний – 6%. Несколько большей неравномерностью отличается сток р. Уфтуги (д. Маланьевская), где леса занимают 73%. Доля его весной возрастает до 75%, в летне-осенний период сокращается до 21%, в зимний – до 4% (табл. 22).

Сток неизученных малых притоков оз. Кубенского, впадающих с западного побережья, где показатель лесистости водосборов колеблется от 22 до 69%, вероятно, отличается еще большей неравномерностью распределения в году. По аналогии с р. Ёмой, притоком верхней Сухоны, у которой показатель лесистости водосбора 67%, можно принять внутригодовое распределение стока западных притоков озера в среднем равным для весны – 79%, лета и осени – 17%, зимы – 4% от годовой величины.

Таблица 22

Средние месячные расходы воды (в м³/сек. – числитель)
и внутригодовое распределение стока рек (в % – знаменатель)
за многолетний период (1951–1973 гг.)

Река, пункт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Кубена, д. Ку- бинская	7.67 1.4	6.50 1.2	6.25 1.1	118 21.4	220 39.8	48.8 8.8	22.2 4.1	19.6 3.5	21.2 3.8	40.4 7.3	30.6 5.5	11.4 2.1	46.0 100
Уфтуога, д. Ма- ланьевская	0.73 1.0	0.50 0.7	0.47 0.6	18.7 25.4	30.8 41.9	5.53 7.5	1.96 2.7	2.33 3.2	2.51 3.4	4.89 6.6	3.80 5.2	1.31 1.8	6.13 100
Сухона, д. Ра- баньга	57.4 3.6	35.0 2.3	24.0 1.6	44.8 2.8	345 21.6	266 16.7	173 10.9	155 9.7	137 8.6	135 8.5	130 8.2	87.9 5.5	133 100

Как показывают эти данные, основной фазой гидрологического режима рек района служит весенне-половодье. На основных притоках оз. Кубенского оно начинается в среднем 10–15 апреля и достигает пика 1–5 мая, средняя продолжительность половодья – полтора–два месяца. На малых притоках эти сроки обычно сдвигаются на одну–полторы недели. Половодье заканчивается раньше на малых реках – в середине мая, на реках Кубене и Уфтуге – в первой декаде июня. Проходит оно преимущественно в виде одной волны с небольшими пиками на спаде, вызванными дождовыми паводками, и в условиях дружного снеготаяния характеризуется большой интенсивностью подъема и спада воды.

Основными факторами, определяющими объем весеннего половодья, являются снегозапасы на водосборе реки и количество жидких осадков, выпадающих в весенне время. Устойчивый снежный покров в районе образуется во второй декаде ноября, достигает максимальной высоты во второй–третьей декаде марта и сходит – во второй декаде апреля. Запасы воды в снежном покрове лесной зоны измеряются 140–200 мм. Количество осадков, выпадающих в период снеготаяния и схода снежного покрова, составляет около 25% годовой величины; их доля в весеннем стоке – в среднем от 10 до 30% (Ресурсы..., 1972).

В период половодья расходы воды в реках достигают наибольших значений. Так, на р. Кубене (д. Кубинская) при среднем расходе воды, соответствующем пику половодья, равном $577 \text{ м}^3/\text{сек.}$, максимальный расход весной 1957 г. достигал $1200 \text{ м}^3/\text{сек.}$, в 1961 г. – $1080 \text{ м}^3/\text{сек.}$. В самую многоводную за 23-летний период наблюдений весну 1966 г. расход воды в р. Кубене во время пика половодья равнялся всего лишь $667 \text{ м}^3/\text{сек.}$. Одним из самых высоких было половодье 1974 г., хотя и сравнительно небольшое по объему: максимальный расход воды составлял $822 \text{ м}^3/\text{сек.}$. Минимальное значение пика половодья было отмечено весной 1970 г., когда наибольший весенний расход воды был равен $288 \text{ м}^3/\text{сек.}$. Пределы колебания модуля стока р. Кубены в период прохождения пика половодья, по данным 23-летних наблюдений, находились в пределах от 247 (1961 г.) до $59.3 \text{ л}/\text{сек.} \text{ км}^2$ (1970 г.). На р. Уфтуге (д. Маланьевская) максимальный расход весеннего половодья достигал $209 \text{ м}^3/\text{сек.}$ в 1957 г., наиболее низким было половодье в 1970 г., во время пика которого расход воды составил $47.6 \text{ м}^3/\text{сек.}$. Модули стока для этих лет соответственно были равны 338 и $77 \text{ л}/\text{сек.} \text{ км}^2$.

Время наступления летне–осенней межени зависит как от особенностей половодья, так и от величины рек. В годы с ранней и дружной весной и без паводков на спаде половодья переход рек на грунтовое питание осуществляется в более ранние сроки: на р. Уфтуге – в конце мая, на р. Кубене – в начале июня, тогда как обычно начало межени на этих реках приходится, соответственно, на третью декаду июня и первую декаду июля. На малых реках период с низкими расходами воды наступает в первых числах

июня. В годы с растянутым половодьем и обильными осадками на его спаде переход к межени происходит на больших притоках в первой половине августа, на малых – в конце июня.

Продолжительность меженного периода на реках Кубене и Уфтугое – от 1–1.5 до 3 месяцев, на малых притоках – до 5 месяцев. Средняя продолжительность периода с расходами воды, близкими их минимальным суточным значениям, характеризующим глубокую межень, составляет от 7 до 15 дней (Ресурсы..., 1972). Самые маловодные месяцы в теплое время года – это июль и август. Сток больших рек сокращается по сравнению с половодьем почти в 10–15, а малых – в 30–40 раз. Минимальный средний месячный сток, отмеченный на р. Кубене (д. Кубинская) в августе 1973 г., составил $3.39 \text{ м}^3/\text{сек.}$, на р. Уфтугое (д. Маланьевская) расход воды в это время снизился до $0.19 \text{ м}^3/\text{сек.}$ при среднем многолетнем значении августовского стока на этих реках, соответственно равном 19.6 и $2.33 \text{ м}^3/\text{сек.}$.

Почти ежегодно летне-осенняя межень нарушается дождовыми паводками, которые наблюдаются вплоть до установления ледостава. Их продолжительность – от нескольких дней до 1.5 месяцев. Увеличение стока рек во время паводков бывает довольно значительным. Например, в октябре 1957 г. сток р. Кубены (д. Кубинская) составлял $111 \text{ м}^3/\text{сек.}$, при среднем многолетнем его значении для данного месяца $40.4 \text{ м}^3/\text{сек.}$ на р. Уфтугое (д. Маланьевская) $15.5 \text{ м}^3/\text{сек.}$ против $4.89 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Амплитуда колебания среднего месячного стока за время летне-осенней межени для р. Кубены находится в пределах от $3.39 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (август 1973 г.) до $113 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (август 1961 г.), для р. Уфтуги – от $0.19 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (август 1973 г.) до $23.4 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (август 1961 г.).

В конце ноября–начале декабря реки района переходят на зимний режим, характеризующийся наиболее низким стоком в году. В марте расходы воды в реках достигают минимальных значений: на р. Кубене (д. Кубинская), по средним многолетним данным, – $6.25 \text{ м}^3/\text{сек.}$, на р. Уфтугое (д. Маланьевская) – $0.47 \text{ м}^3/\text{сек.}$. В противоположность летне-осенней межени амплитуда колебания среднего месячного стока в зимний период значительно меньше и составляет для указанных рек соответственно от $4.21 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (март 1955 г.) до $47.4 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (декабрь 1969 г.) и от $0.17 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (февраль 1973 г.) до $6.49 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (декабрь 1969 г.). Средняя продолжительность зимней межени – 130–140 дней.

Для малых неизученных рек, впадающих с западного побережья озера, характеристики стока можно ориентировочно принять аналогичными тем, что у р. Ёмы, с поправкой на размер их водохранилищных бассейнов. Средний многолетний сток наиболее многоводного месяца – апреля – для этих рек колеблется от 0.50 до $2.80 \text{ м}^3/\text{сек.}$ в период летне-осенней межени – в августе – от 0.011 до $0.065 \text{ м}^3/\text{сек.}$, в месяц с наименьшим стоком рек – феврале – от 0.005 до $0.027 \text{ м}^3/\text{сек.}$ У самого крупного среди

западных притоков – р. Бол. Ельмы – аналогичные показатели имеют следующие значения: средний месячный сток апреля – около $20 \text{ м}^3/\text{сек.}$, августа – $0.45 \text{ м}^3/\text{сек.}$, февраля – $0.20 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Формирование стока рек в годы работы Вологодско-Архангельской экспедиции проходило в условиях значительного преобладания Е-формы циркуляции, особенно проявившейся в теплый период 1972 и 1974 гг., и ослабленного влияния, а в отдельные месяцы и полного отсутствия западного и меридионального переноса воздушных масс. Характерной особенностью 1972–1974 гг. является существование длительных теплых периодов со средней месячной температурой воздуха более чем на 2° выше нормы, каковыми оказались летние месяцы 1972 г., весенние месяцы 1973 г. и осень 1974 г. Разнообразными были и метеорологические условия холодной половины года: зима 1972 г. была холодной и мало-снежной, зима 1973 г. – теплой, с осадками выше нормы, а зимние месяцы 1974 г. отличались высокой температурой воздуха в феврале и марте, сопровождающейся осадками в среднем ниже нормы (гл. 2, наст. изд.).

В то время как количество атмосферных осадков в 1973 и 1974 гг. было близко норме и только в 1972 г. их годовая сумма оказалась на 194 мм меньше ее, сток рек во все три года был ниже средней величины. По данным поста на р. Кубене (д. Кубинская), годовой сток 1972 г. был на 24% ниже средней многолетней величины за 23-летний период, в 1973 г. – на 40% и в 1974 г. – на 16%. Интересно отметить, что в то время как атмосферные осадки почти во все месяцы (кроме трех) были ниже нормы в 1972 г., наиболее маловодным годом оказался 1973 г. По данным постов на р. Кубене (д. Кубинская) и р. Уфтуоге (д. Маланьевская), это был год с минимальным за 23-летний период наблюдений средним годовым стоком с обеспеченностью, равной 96%. Средние месячные расходы воды в течение всего года (кроме апреля) были меньше многолетних характеристик, а за период с мая по август относились к числу минимальных за весь ряд наблюдений. Значительное снижение водности рек в 1973 г., вероятно, вызвано не только метеорологической обстановкой этого, но и низкими осадками предыдущего года, что сократило запасы влаги на водосборе. Внутригодовое распределение стока рек во все три года находилось в соответствии с особенностями маловодной фазы и характеризовалось увеличением доли весеннего половодья и значительным снижением летне-осеннего стока. Несмотря на свойственную всем годам общую маловодность, каждый из них отличался своими гидрологическими особенностями, определившими режим рек.

Общей чертой гидрологического режима 1972–1974 гг. является пониженная водность притоков оз. Кубенского во все сезоны по сравнению не только со средними многолетними их характеристиками, но и в большинстве случаев со средним стоком соответствующих сезонов маловодной фазы (рис. 17). Особенно заметно

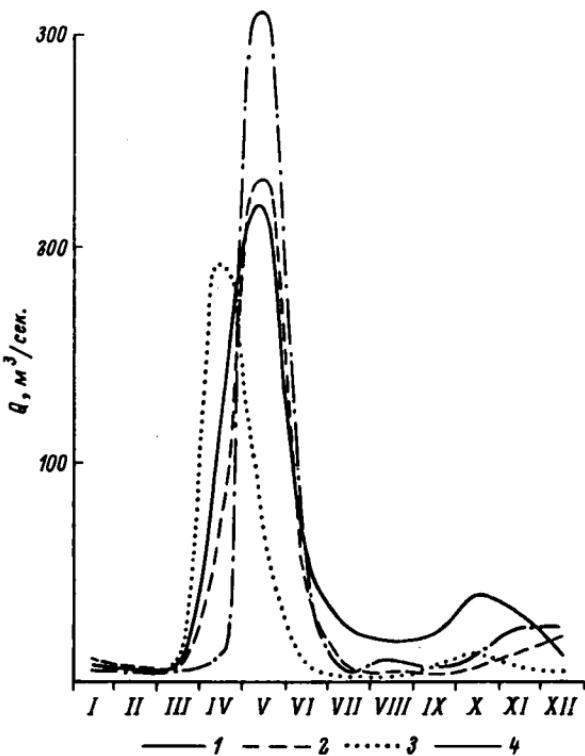


Рис. 17. Колебания средних месячных расходов воды р. Кубены (д. Кубинская).

1 - 1951-1973 гг.; 2 - 1972 г.; 3 - 1973 г.; 4 - 1974 г.

маловодность этих лет проявилась на относительно небольших притоках озера, как, например, на р. Уфтуге, сток которой ни в один сезон не превысил средних величин. Сезонный сток на р. Кубене только в зиму 1972-1973 гг. превзошел средние многолетние значения.

Внутригодовое распределение стока рек по месяцам отличалось некоторым разнообразием. Половодье на р. Кубене в 1972 г. началось 10 апреля и продолжалось до конца июня, достигнув пика 5 мая. В то время как средние месячные расходы воды в апреле и июне были ниже средних многолетних значений, сток мая превысил норму, хотя максимальный расход в половодье, равный $446 м^3/сек.$, был ниже среднего. В остальное время средние месячные расходы воды р. Кубены были меньше многолетних показателей, особенно в сентябре и октябре, сократившись в 5-7 раз по сравнению с ними. Как показало расчленение гидрографов стока, характерной особенностью режима р. Кубены в летне-осенний период 1972 г., отличающей его от других лет, является значи-

тельное преобладание в ее питании (более 75%) грунтовой составляющей в течение длительного времени, а именно с июля по октябрь, причем, судя по гидрографу стока, вероятно, с 7 августа по 29 сентября река полностью перешла на снабжение подземными водами.

Теплая зима 1973 г. вызвала раннее и дружное половодье на притоках оз. Кубенского. Интенсивному росту уровня воды на реках предшествовал его постепенный подъем от таяния снега при оттепелях почти с середины февраля. Начало половодья на р. Кубене приходилось на 1 апреля, пик наступил 15 апреля, окончание пришло на конец мая. Половодье 1973 г. отличается быстрым нарастанием максимального расхода, составившего $451 \text{ м}^3/\text{сек.}$, к тому же приходящегося на время, когда в средние годы только начинается поступление талых вод с водосборного бассейна. В результате этого явления средний месячный расход воды в апреле на р. Кубене (д. Кубинская) был более чем в 1.5 раза выше среднего многолетнего, сократившись затем в мае и июне по сравнению с ним соответственно в 3 и 6 раз, что поставило сток воды этих месяцев в ряд минимальных средних месячных значений за весь период наблюдений. Аналогичный режим отмечен и на р. Уфтуоге.

Исключительно маловодными были реки района и в летнюю межень 1973 г., средние месячные показатели которой оказались минимальными за весь 23-летний период наблюдений. В июле и августе р. Кубена имела смешанное питание со значительным преобладанием грунтовых вод, составивших соответственно 80 и 90% от общего объема стока реки в эти месяцы. Анализ гидрографа стока за это время дает основание предполагать, что с 20 июля по 23 августа река полностью перешла на грунтовое питание. Далее до наступления ледостава отмечался паводок от осенних дождей.

Для 1974 г., в среднем более многоводного по сравнению с двумя предыдущими, характерной особенностью является высокое и сравнительно непродолжительное половодье. Подъем воды на р. Кубене начался в последних числах апреля и достиг пика 12 мая, во время которого расход воды составил $822 \text{ м}^3/\text{сек.}$, почти в 1.5 раза превысив средний максимальный расход. Интенсивный подъем сменился не менее быстрым спадом половодья, закончившимся в начале июня, что привело к наступлению ранней и продолжительной межени. В июле и сентябре доля грунтового питания составляла более 75%. Августовская межень на р. Кубене была нарушена небольшим распластанным дождевым паводком, изменившим соотношение грунтовых и поверхностных вод, объем которых составил соответственно 55. и 45%.

Поверхностный приток

Как уже отмечалось ранее, гидрометрическая сеть, существующая в настоящее время на реках Кубене и Уфтуоге, фиксирует поверхностный приток более чем с половины площади водосборного

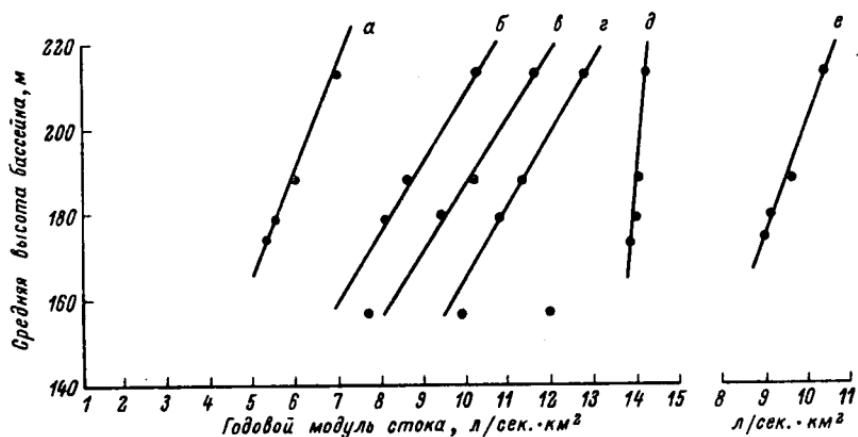


Рис. 18. Графики зависимости среднего годового модуля стока от высоты бассейнов рек Кубены и Уфтуги.

а - 1973 г.; б - 1963-1973 гг.; в - 1951-1973 гг.; г - 1951-1962 гг.; д - 1966 г.; е - 1966-1971 гг.

бассейна оз. Кубенского. Однако для большинства лет (1951-1965 гг.) расчетного периода, принятого для составления водного баланса озера, доля неизученного притока возрастает до 62%. Поскольку основная роль в питании озера принадлежит р. Кубене, дренирующей 76% площади озерного водосбора, наибольшее внимание было уделено именно этой реке. Требовалось не только привести сток р. Кубены к устью от гидрометрических створов, замыкающих для большинства лет наблюдений только 44% площади речного бассейна, но и оценить возможность ее использования в качестве аналога для некоторых неизученных притоков с меньшими водосборами.

С этой целью для 1966-1971 гг., располагающих наиболее полными данными о стоке р. Кубены и ее притоков, была построена зависимость среднего для данного периода годового модуля стока от средней высоты водосборного бассейна на отдельных участках реки (рис. 18, е). Три верхние точки на этом графике соответствуют трем постам на самой Кубене, а четвертая, равная сумме стока по трем замыкающим створам (р. Кубена - д. Кубинская, р. Сить - д. Козлиха и р. Сямжена - д. Сямжа), ориентировано отнесена к расположенному в нескольких километрах ниже по течению р. Кубены створу - д. Горки, по которому нет данных о стоке, но имеются сведения о средней высоте водосбора. Судя по графику, в условиях формирования стока р. Кубены в указанный 6-летний период с понижением средней высоты бассейна на 10 м происходило уменьшение модуля годового стока на 3-4%. Опреде-

ленный по полученной связи $M = f(H_{cp})$ модуль стока в устье р. Кубены за эти годы составил 8,9 л/сек, км^2 , оказавшись на 3% меньше модуля стока в замыкающем створе (р. Кубена, д. Кубинская). Около 4% составило это отклонение на аналогичных связях, построенных для р. Кубены, за полный цикл, многоводную и маловодную фазы (рис. 18, б, в, г). Приведение стока р. Кубены к устью по связи $M = f(H_{cp})$, вероятно, позволило избежать завышения водности главного притока озера на указанную величину. Из-за отсутствия данных построение зависимости $M = f(H_{cp})$ для водосборного бассейна р. Уфтуги не представляется возможным. В силу того, что по характеру рельефа водосборы рек Уфтуги и Кубены значительно отличаются друг от друга (разница в средней высоте их бассейнов составляет 25 м), следует предположить несколько иную закономерность в снижении модуля стока р. Уфтуги по направлению к устью. Нижняя точка на графике (рис. 18, б, в, г), соответствующая створу р. Уфтуга, д. Маланьевская, значительно отклоняется от прямых, принятых для р. Кубены в качестве расчетных. Чтобы избежать завышения стока р. Уфтуги при приведении его к устью от замыкающего створа, характеризующего всего лишь половину ее водосборного бассейна, был использован средний модуль стока для данного района.

При анализе периода с 1966 по 1971 г., наиболее освещенного данными о стоке, оказалось, что модуль годового стока, определенный по связи $M = f(H_{cp})$ для устья р. Кубены, равен среднему взвешенному модулю годового стока, рассчитанному для этих же лет по наблюдениям всех четырех замыкающих створов на водосборе оз. Кубенского. Поскольку для остальных лет расчет среднего взвешенного модуля годового стока по тому же числу гидрометрических постов не представляется возможным, его величина принималась равной модулю стока в устье р. Кубены, снятому с графика $M = f(H_{cp})$. Этот модуль стока использовался для приведения стока р. Уфтуги к устью, а также для оценки стока наиболее значительных неизученных рек (Порозовицы, Большой Ельмы и Еды) при определении общего притока в оз. Кубенское за отдельные фазы, 23-летний цикл и характерные годы.

Внутригодовое распределение стока в устье изученных рек принималось аналогичным тому, какое было на вышерасположенных постах: на р. Уфтуге – непосредственно по замыкающему створу в д. Маланьевской, а на р. Кубене – еще и с учетом влияния боковых притоков Сити и Сямжены. Для речной сети, включающей неизученные притоки с водосборами менее 100 км^2 и межбассейновые пространства, в качестве аналога служила соседняя р. Ёма (д. Новое), небольшой приток второго разряда в верховьях р. Сухоны со сходными гидрографическими и высотными показателями водосбора, а также меньшим по сравнению с крупными реками модулем годового стока. Внутригодовое распределение стока неизученной р. Порозовицы, являющейся звеном Северодвинского водного пути, считалось подобным режиму стока на верхнем участке р. Су-

Т а б л и ц а 23

Средние месячные расходы воды (в м³/сек.) притоков оз. Кубенского,
принятые при составлении водного баланса за 1951-1973 гг.

	I	II	III	IV	V	VI	УП	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Кубена	16.5	15.6	12.9	297	445	95.0	48.2	41.2	46.3	85.9	67.0	24.7	100
Уфтуога	1.38	1.07	0.82	35.9	57.2	10.6	3.69	4.37	4.79	8.99	7.34	2.46	11.6
Порозовица	3.54	2.52	1.57	2.86	21.4	17.1	10.8	9.59	8.80	8.40	8.38	5.44	8.40
Бол. Ельма	0.26	0.21	0.41	19.4	8.06	1.78	0.86	0.45	0.85	1.98	2.12	0.63	3.08
Ёда	0.096	0.06	0.06	2.72	5.24	0.73	0.36	0.42	0.54	0.89	0.67	0.20	1.00
Западные при- токи	0.17	0.12	0.27	12.6	5.43	1.15	0.60	0.29	0.56	1.33	1.38	0.41	2.03
Межбассейновые пространства	0.40	0.27	0.40	18.3	18.4	2.92	1.48	1.35	1.90	3.50	2.98	0.90	4.40

Т а б л и ц а 24

Поверхностный приток (в км^3 – числитель) в оз. Кубенское
и его внутригодовое распределение (в % – знаменатель) за различные периоды

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Всего за год
1951-1962 гг. (много-водная фаза)	0.059 1.2	0.051 1.1	0.048 1.0	0.995 21.3	1.676 35.6	0.467 9.9	0.249 5.3	0.228 4.9	0.238 5.1	0.364 7.8	0.243 5.2	0.077 1.6	4.694 100
1963-1973 гг. (мало-водная фаза)	0.058 1.7	0.044 1.3	0.043 1.2	0.945 27.3	1.300 37.6	0.228 6.6	0.126 3.6	0.072 2.1	0.083 2.5	0.222 6.4	0.226 6.5	0.108 3.2	3.455 100
1951-1973 гг. (полный цикл увлажненности)	0.060 1.4	0.048 1.2	0.045 1.1	1.028 25.0	1.484 36.0	0.333 8.1	0.176 4.3	0.152 3.7	0.163 4.0	0.295 7.2	0.232 5.7	0.093 2.3	4.101 100
1966 г. (много-водный год)	0.089 1.4	0.044 0.7	0.038 0.6	1.746 28.0	2.719 43.5	0.389 6.2	0.106 1.7	0.067 1.1	0.208 3.3	0.611 9.8	0.173 2.8	0.056 0.9	6.246 100
1973 г. (мало-водный год)	0.041 1.9	0.026 1.2	0.036 1.6	1.270 57.6	0.428 19.4	0.068 3.1	0.036 1.6	0.059 1.5	0.034 2.8	0.108 4.9	0.062 2.8	0.035 1.6	2.203 100

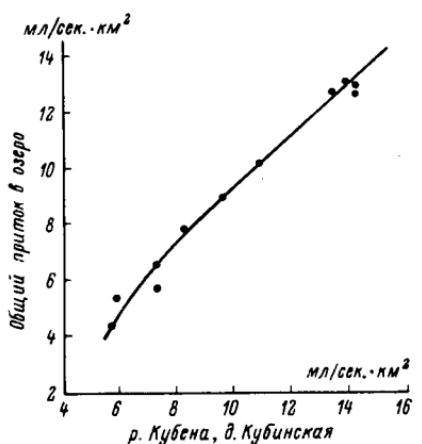


Рис. 19. График связи годовых модулей поверхностного притока в оз. Кубенское и стока р. Кубены (д. Кубинская).

оз. Кубенского за полный цикл и фазы оказалась менее 2%, что дает основание считать полученные данные по притоку достоверными (разд. 3.3, наст. изд.). Увеличение невязки водного баланса за 1972 и 1973 гг., приходящиеся на конец маловодной фазы и характеризующиеся низкими значениями стока рек, можно объяснить большей погрешностью в определении общего притока воды в оз. Кубенское. В маловодные годы связь водного режима рек с физико-географическими условиями усложняется, что особенно затрудняет выбор реки-аналога для неисследованной территории малых водосборов.

Годовой объем речных вод, поступающих в оз. Кубенское, в среднем за 23-летний период равен 4.101 км^3 , в многоводную фазу – 4.694 км^3 , а в маловодную – 3.455 км^3 , что на 11% меньше многолетнего притока. В многоводный 1966 г. поверхностный приток в озеро достигал 6.246 км^3 , а в маловодный 1973 г. сократился до 2.203 км^3 (табл. 24). Его внутригодовое распределение зависит в основном от режима р. Кубены, обеспечивающей значительное преобладание талых вод в питании озера. Если в среднем за многолетний период за три весенних месяца в озеро поступает 69% общего притока, то в маловодную фазу доля половодья возрастает до 72%, а в многоводную падает до 67%. Однако в характерные годы отмеченная тенденция может нарушаться и соотношения в сезонном притоке становятся несколько иными. Так, например, в многоводном 1966 г. ввиду небольших осенних паводков на весну приходилось почти 78%, а в маловодном 1973 г. – 80% притока за год. Доля летне-осенних вод меняется от 28.3 (много-

хонь (д. Рабаньга), поскольку сезонный сток обеих рек искусственно зарегулирован для целей судоходства (табл. 23).

Выбранная методика позволила рассчитать не только общий приток воды в озеро за 23-летний цикл, фазы, характерные годы и в период работы Вологодско-Архангельской экспедиции, но и оценить сток неизученных рек, представляющих интерес для гидрохимических, гидробиологических и других исследований водоема. Если принять, что приведение к устью стока изученных рек Кубены и Уфтуги сделано с достаточной точностью, то неисследованный водосбор озера составляет всего лишь 15%. Выявленная невязка при расчетах водного баланса

Т а б л и ц а 25

Годовой поверхностный приток в оз. Кубенское
и сток из него (в км³)

Год	Приток	Сток	Год	Приток	Сток
1951	4.100	4.762	1964	2.961	3.217
1952	3.910	3.311	1965	3.530	3.784
1953	5.203	5.834	1966	6.246	6.565
1954	3.784	3.103	1967	3.141	3.437
1955	6.181	6.244	1968	4.005	4.384
1956	3.784	3.880	1969	4.825	4.510
1957	6.150	5.803	1970	2.699	3.122
1958	5.046	5.393	1971	3.005	2.957
1959	4.100	4.604	1972	2.738	2.639
1960	2.556	2.772	1973	2.203	2.148
1961	6.150	5.708	1951–1962	4.694	4.742
1962	5.368	5.487	1963–1973	3.455	3.635
1963	2.643	3.217	1951–1973	4.101	4.213

водная фаза) до 20.7% (маловодная фаза), а зимней межени – соответственно от 4.6 до 7.3% общей величины поверхностного притока. Максимальное поступление речных вод в озеро наблюдается в мае (около 36–38%), минимальное приходится на март (немного более 1% годовой величины). В многоводном 1966 г. майский приток составил 43.5%, а в 1973 г. наибольший весенний приток имел место в апреле и составил более половины годового объема.

Изложенная выше методика расчета поверхностного притока в оз. Кубенское позволила определить эту составляющую водного баланса отдельно для расчетного периода, фаз и характерных лет, совпадающих с годами, наиболее освещенными гидрологическими данными. На основе полученных материалов была построена связь годового модуля общего притока в озеро с годовым модулем стока р. Кубены (д. Кубинская), которая и использовалась для расчета годового притока в озеро в отдельные годы всего 23-летнего периода (рис. 19). Применение этой кривой дало значительные невязки водного баланса озера (10–18%) только для трех лет, которые и были учтены в представленных в табл. 25 сведениях о годовом притоке поверхностных вод в оз. Кубенское.

Сток

Сток воды из оз. Кубенского осуществляется по р. Сухоне, берущей начало в юго-восточной части побережья. Она вытекает двумя рукавами: главный из них – северный, того же названия, а южный, заросший водной растительностью и отмирающий, называется Большим Пучкасом. Южный рукав имеет длину около 20 км и соединяется с основным руслом на 8 км от его истока. В 7,5 км от истока р. Сухоны, у д. Шера, для регулирования стока из оз. Кубенского в 1834 г. была построена плотина „Знаменитая“. В 1944 г. она подверглась капитальной реконструкции, в результате чего с 1945 г. попуски воды из озера в период навигации значительно увеличены.

В верховьях р. Сухона протекает по плоской низменности, представляющей дно древней озерной котловины, сложенной мощной толщей озерно-ледниковых отложений. Берега реки на верхнем участке низкие, преобладающие породы – глины и суглинки. Слабая дренированность территории при обильном подтоке грунтовых вод и застаивании паводковых и дождевых вод обусловила сильную заболоченность и заторфованность долины р. Сухоны. Ширина реки местами достигает 400 м, средний уклон – 0,000014 м/км (Филенко, 1966).

Малые уклоны р. Сухоны в верховьях в сочетании с более ранним вскрытием ее южных притоков – Вологды и Лежи – приводят к частому образованию обратного течения сухонских вод в оз. Кубенское. Это явление наблюдается обычно в апреле и продолжается от 3 до 20 дней (в среднем 8–12 дней); максимальные значения отрицательных расходов достигают 250–275 м³/сек. Повторяемость лет с обратными течениями на р. Сухоне составляет 82%. В летне-осенний период поворот сухонских вод в сторону озера отмечается лишь в редкие годы после выпадения интенсивных дождей (Давыдов, 1955; Нежиховский, 1961). За время с 1951 по 1973 г. средние месячные апрельские расходы р. Сухоны только в 1952, 1953 и 1964 гг. были с отрицательным знаком. Наибольший расход обратного течения реки составил 214 м³/сек.

В гидрологическом отношении р. Сухона изучена сравнительно хорошо. Включение ее в качестве одного из звеньев в состав Северодвинского водного пути способствовало ранней постановке наблюдений за ее режимом. Первые систематические наблюдения за уровнем воды стали проводиться в 1877 г. в нижнем бьефе шлюза „Знаменитого“, а за стоком воды – на посту в д. Рабаньга, расположенному в 33 км от истока.

На водный режим р. Сухоны в верхнем течении оказывает влияние естественное и искусственное регулирование стока из оз. Кубенского. Естественное (озерное) регулирование проявляется обычно в более растянутом подъеме весеннего половодья и некотором запаздывании наступления его пика по сравнению с остальной рекой. В самом начале спада половодья, а в маловодные годы и

на его подъеме, сток из оз. Кубенского имеет искусственный режим, сохраняющийся в течение всей навигации. Плотина при шлюзе „Знаменитом” поддерживает на озере определенный подпорный горизонт, постепенно срабатываемый в течение летней межени. Особенности регулирования стока из озера отражают данные по посту в д. Рабаньга. Вниз по течению по мере возрастания бокового притока в р. Сухону постепенно ослабевает влияние искусственного регулирования в истоке реки. Водный режим р. Сухоны в среднем течении (г. Тотьма) уже близок к естественному и сохраняется таким на всем ее протяжении.

Весенне половодье в верховьях р. Сухоны начинается в середине апреля и из-за регулирования стока из оз. Кубенского продолжается около 3 месяцев; наступление его пика приходится на середину мая. Наибольшие расходы половодья в среднем составляют около $480 \text{ м}^3/\text{сек.}$; весной 1966 г. максимум достиг $860 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Весенний подъем уровня воды на р. Сухоне у шлюза „Знаменитого” относительно зимней межени в среднем составляет 4.5 м, в многоводные годы – 6.0, в маловодные – 3.5 м (Ресурсы..., 1972).

Благодаря искусственному регулированию сток из оз. Кубенского отличается более равномерным внутригодовым распределением по сравнению с режимом поверхностного притока. В течение трех весенних месяцев из озера вытекает в среднем около 41% годового объема стока, причем в многоводную и маловодную фазы это соотношение сохраняется почти без изменений. Немногим больше доля весеннего стока из озера в летне-осенний период – 44–47%, на долю зимы приходится 12–14% общей величины (табл. 26). Регулирование стока из оз. Кубенского, удовлетворяющее требованиям судоходства по верхней Сухоне, обусловило отмеченные особенности сезонного режима, не зависящего в значительной степени от водности лет и периодов. Только в многоводные годы перераспределение весеннего стока приближается к естественному режиму, примером чего может служить 1966 г., когда весенний сток составил 54.3% годового объема.

По данным 23-летнего расчетного периода из оз. Кубенского в среднем за год вытекает 4.213 км^3 при крайних значениях от 6.565 (1966 г.) до 2.148 км^3 (1973 г.). В соответствии с водностью лет изменялся и объем весеннего стока из озера: от 3.557 до 0.915 км^3 при среднем значении 1.731 км^3 .

В годы экспедиционных исследований оз. Кубенского поверхностный сток с его водосбора был меньшим по сравнению со средними данными (табл. 27): в 1972 г. – на 33%, в 1973 г. – на 46% и в 1974 г. – на 13% ниже многолетнего значения. Некоторые отличия водного режима в эти годы оказались на особенностях внутригодового распределения притока воды в озеро. И хотя основную роль в этом процессе играет р. Кубена, остальные реки тоже вносят некоторые, пусть незначительные, но изменения в порядок поступления поверхностных вод. Их влияние, более всего сказываю-

Таблица 26

Сток воды из оз. Кубенского (в км³ – числитель) и его внутригодовое распределение
(в % – знаменатель) за различные периоды

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Всего за год
1951–1962 гг. (много-водная фаза)	0.159 3.4	0.091 1.9	0.066 1.4	0.106 2.2	1.031 21.8	0.805 17.0	0.540 11.4	0.477 10.1	0.400 8.4	0.418 8.8	0.400 8.4	0.249 5.2	4.742 100
1963–1973 гг. (мало-водная фаза)	0.147 4.1	0.078 2.1	0.062 1.7	0.128 3.5	0.834 22.9	0.562 15.5	0.372 10.3	0.343 9.4	0.308 8.5	0.305 8.4	0.274 7.5	0.222 6.1	3.635 100
1951–1973 гг. (полный цикл увлажненности)	0.154 3.7	0.085 2.0	0.064 1.5	0.116 2.8	0.925 22.0	0.699 16.4	0.465 11.1	0.415 9.9	0.355 8.4	0.362 8.6	0.338 8.0	0.235 5.6	4.213 100
1966 г. (много-водный год)	0.187 2.8	0.075 1.1	0.045 0.7	0.180 2.7	1.973 30.2	1.404 21.4	0.627 9.6	0.410 6.2	0.344 5.2	0.512 7.8	0.513 7.8	0.295 4.5	6.565 100
1973 г. (мало-водный год)	0.072 3.4	0.027 1.3	0.034 1.6	0.280 13.1	0.340 15.8	0.295 13.7	0.235 10.9	0.228 10.6	0.222 10.3	0.193 9.0	0.160 7.4	0.062 2.9	2.148 100

Т а б л и ц а 27

Поверхностный приток (числитель) в оз. Кубенское
и сток (знаменатель) из него (в км³) за годы работы экспедиции

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1972	0.044 0.077	0.034 0.042	0.033 0.056	0.638 0.030	1.392 0.571	0.220 0.391	0.047 0.308	0.040 0.316	0.041 0.277	0.067 0.250	0.086 0.183	0.096 0.138	2.738 2.639
1973	0.041 0.072	0.026 0.027	0.036 0.034	1.270 0.280	0.428 0.340	0.068 0.295	0.036 0.235	0.034 0.228	0.059 0.222	0.108 0.193	0.062 0.160	0.035 0.062	2.203 2.148
1974	0.031 0.038	0.032 0.024	0.037 0.044	0.093 0.136	2.326 0.662	0.394 0.842	0.063 0.268	0.085 0.246	0.061 0.228	0.091 0.214	0.239 0.203	0.131 0.210	3.583 3.115

щееся в период половодья, проявляется в распластывании и некотором (в пределах 2-3%) перераспределении весеннего притока между месяцами.

Различия в метеорологических условиях отдельных лет отражаются в основном на размерах весеннего половодья, на долю которого в 1972 г. приходилось 82%, в 1973 г. - 80% и в 1974 г. - 78% годового притока при среднем многолетнем значении его доли 69%. Наибольший приток речных вод в 1972 г. приходился на май, в течение которого в озеро поступила почти половина объема годового притока; распределение его в апреле и июне было аналогичным многолетним данным. Весной 1973 г. наибольший приток отмечался в апреле - 58% годового. В 1974 г. апрель, наоборот, оказался с низким притоком, характерным для зимних месяцев, тогда как в мае он достигал 65% годового объема. По сравнению с весенним периодом доля притока в летне-осеннюю межень сократилась почти в 2-3 раза.

Сокращение поверхностного притока, имевшее место в 1972-1974 гг., повлекло за собой и уменьшение стока из озера в процентном отношении на близкую величину. Что касается внутригодового распределения стока, то он и в эти годы отличался свойственным ему режимом: расхождения с многолетними характеристиками были незначительными. Несколько выделялась весна 1974 г., когда сток из озера в течение мая и июня составил почти половину годового объема против 38%, обычных для данного времени года.

Ежегодно до прохождения паводка в верховьях р. Сухоны наблюдалось обратное течение ее вод в озеро. Это явление отмечалось на протяжении 5-8 дней, максимальный расход достигал $114 \text{ м}^3/\text{сек}$. (7 мая 1974 г.) при среднем месячном стоке данного месяца, равном $245 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Несмотря на большое значение Кубены и Уфтуги в питании озера, соотношение притока от крупных и малых рек от года к году не остается постоянным. Сравнение, проведенное для 1966-1974 гг. по данным замыкающих постов в бассейнах Кубены и Уфтуги и поста на р. Сухоне (д. Рабаньга), показало, что в среднем учтенный приток составляет около 60% стока из озера. В сравнительно маловодном 1970 г. доля учтенного притока сократилась до 49%, что, вероятно, обусловлено увеличением роли малых рек, имеющих годовой модуль стока на 20% больше, чем на крупных реках. В 1972-1974 гг., которыми заканчивается маловодная фаза, учтенный приток составил 70% стока из озера; участие малых рек в питании озера значительно сократилось. В эти годы годовой модуль стока на малых реках был на 10-60% меньше, чем на больших.

Характерными особенностями гидрологического режима рек в годы полевых исследований оз. Кубенского являются уменьшение объема весеннего половодья, значительное сокращение летнего стока, удлинение периода летне-осенней межени, отличающейся преоб-

ладанием грунтовых вод в питании рек, заметным ослаблением влияния малых притоков.

3.2. Осадки и испарение

Осадки и испарение с поверхности озера являются составляющими водного баланса, и хотя роль их в рассматриваемом районе не так велика, как притока в озеро и стока из него (Малинина, Татаринова, 1974), при расчете водного баланса за конкретный период и отдельные фазы этого периода они должны быть определены. По оз. Кубенскому эти составляющие для многолетнего периода (1900–1960 гг.) недавно подсчитаны заново (Пронин, 1970). По этим данным, на поверхность озера выпадает 768 мм осадков, а 526 мм, или 68% их количества, расходуется на испарение с поверхности. Приведенная в „Ресурсах поверхностных вод СССР“ (1972) величина испарения за апрель–октябрь с оз. Кубенского равна 506 мм (1972). Изменчивость осадков на оз. Кубенское и испарение с него (как и у других больших озер района – Лача, Воже, Белого) во времени еще недостаточно выяснена.

В настоящем разделе будут приведены расчеты осадков и испарения с поверхности оз. Кубенского, а также их изменчивость во времени за последний цикл увлажненности территории (1951–1973 гг.).

Известно, что над поверхностью больших водоемов осадков выпадает меньше, чем над сушей (Афанасьев, 1960; Матушевский, 1960, и др.). Первоначально снижение осадков над акваторией больших водоемов по сравнению с береговыми районами было рассчитано равным 8–10% (Натрус, 1964). Более поздние исследования показали, что эффект снижения осадков был несколько преувеличен, поскольку при его оценке не учитывалось различие в скорости ветра над водоемом и сушей, вызывающее разное искажение показаний сравниваемых приборов. С учетом этого обстоятельства различие в сумме осадков, поступающих на поверхность озера и окружающую сушу, составило 5–6%, что находится в пределах общей точности их измерения (Натрус и Мухачева, 1973). Полагая, что для оз. Кубенского это снижение столь же незначительно, мы не принимали его в расчет.

Для воднобалансовых расчетов, в которых требуется увязка осадков со стоком и испарением, большее значение имеет уточнение суммы осадков за счет учета основных ошибок осадкометра. И такая поправка к показаниям осадкометра для среднего количества осадков была заимствована из „Справочника по климату СССР“ (вып. 1, ч. 4, 1968). Среднее многолетнее количество осадков на оз. Кубенское определялось как среднее арифметическое из показаний 11 постов и станций, расположенных по периферии озера:

Маланьевская, Харовская, Рукино, Николо-Корень, Коробово, Котлакса, Сокол и Кадников, Рабаньга, Вологда, Семшино, Новое.

Средняя годовая амплитуда осадков (разность между максимальной средней месячной суммой и минимальной) довольно устойчива и колеблется в районе оз. Кубенского от 36 до 44 мм. Максимальные и минимальные различия месячных сумм между станциями и постами составили соответственно 21 (октябрь) и 7 мм (февраль). В годовых суммах разница была 154 мм (20% от годовых величин). Результаты расчета осадков (в мм) следующие:

1	II	III	1Y	У	У1	УП	VIII	1X	X	X1	XII	Сумма за год
60	46	48	43	57	78	83	82	78	65	60	66	766

На холодный период приходится 36% от годовой суммы осадков, на теплый – 64%. В период июнь–сентябрь выпадает 42% годовой величины. Рассчитанная сумма осадков, выпадающих на оз. Кубенское, практически одинакова с приведенной А.Г. Прониным (Пронин, 1970). Поскольку колебания осадков во времени и по территории невелики, можно перейти к пересчету их на зеркало озера, введя поправку (в мм), полученную для ст. Коробово:

1	II	III	1Y	У	У1	УП	VIII	1X	X	X1	XII	Сумма за год
7	4	6	8	6	12	11	10	11	10	8	7	

За холодный период (XI–III) суммарная поправка для оз. Кубенского составляет +32 мм, за теплый (1Y–X)+68 мм. В дальнейшем, используя осадки по ст. Коробово со всеми поправками к показаниям осадкомера и приведенные выше, получаем осадки на поверхность озера за соответствующий период. В табл. 28 приведены месячные и годовые суммы осадков на оз. Кубенское, наибольшие и наименьшие величины за период 1951–1973 гг. Как видно из ее данных, диапазон колебания сумм осадков во времени довольно широк. Максимальные отклонения сумм осадков от средних за холодный период составляют 33–62%, за теплый – 29%. В отдельные месяцы их количество может изменяться в 12 раз (август). С наибольшим количеством осадков за рассматриваемый период на оз. Кубенском был 1966 г. (на 31% больше среднего), самыми сухими – 1970 и 1972 гг. (на 20% ниже среднего), близкими к среднему – 1956 и 1971 гг. Аномалиями отличались холодный период 1966 г. (осадков на 62% больше средней величины) и 1956 г. (осадков на 32% ниже среднего). Обильными осадками отличался теплый период 1966 г. и малым их количеством соот-

Таблица 28

Месячные и годовые суммы атмосферных осадков (в мм)
на оз. Кубенское за 1951-1973 гг.

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1951	22	11	28	75	73	66	101	40	33	22	62	66	599
1952	47	24	28	35	44	34	87	123	121	70	94	77	784
1953	33	8	27	39	76	76	97	142	89	74	49	34	744
1954	37	20	17	32	25	90	119	44	54	83	40	37	598
1955	73	62	46	51	78	163	39	21	35	96	54	28	746
1956	35	11	24	86	43	67	140	114	53	58	40	39	710
1957	41	44	25	25	37	113	110	100	99	91	31	45	761
1958	54	42	25	24	76	83	39	67	56	86	51	72	656
1959	60	15	19	66	26	180	84	44	59	48	19	41	661
1960	62	39	30	35	23	71	73	64	79	31	55	89	651
1961	30	42	53	38	86	66	100	133	44	31	39	56	718
1962	47	24	50	46	63	79	131	67	122	44	34	34	741
1963	20	28	43	21	32	122	38	77	51	58	43	35	568
1964	49	30	26	29	80	41	119	62	78	65	58	60	691
1965	45	17	41	8	79	61	104	55	38	73	42	98	661
1966	77	48	99	116	93	60	45	122	97	80	31	47	915
1967	26	19	54	63	56	70	62	82	50	99	114	72	767
1968	75	26	25	56	59	42	114	82	41	104	63	55	742
1969	45	20	16	45	91	43	51	87	91	89	107	55	740
1970	41	50	22	27	41	62	60	30	72	61	42	53	561
1971	60	33	41	19	34	82	101	50	75	86	54	75	710
1972	24	19	40	72	37	47	57	12	49	70	92	53	572
1973	43	77	46	75	26	80	33	77	84	99	75	62	777
1974	37	48	27	54	72	51	128	86	50	85	91	83	812
Средняя	45	31	36	47	56	78	83	74	68	70	56	56	700
Наибольшая	77	77	99	116	93	180	140	142	122	104	114	98	915
Наименьшая	20	8	16	8	23	34	33	12	33	22	19	28	561

Таблица 29

Осадки (в мм) различной обеспеченности,
выпадающие на оз. Кубенское, по многолетним данным
(1951-1973 гг.)

Период	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%
XI-III	360	320	270	240	220	205	200	200	190	170	160
IY-X	610	585	540	515	490	480	460	440	410	370	350
I-XII	880	820	760	740	730	720	690	660	630	580	560

Таблица 30

Коэффициент изменчивости (C_v) и среднеквадратическое отклонение (\bar{b} , мм) сумм осадков, выпадающих на оз. Кубенское, по многолетним данным (1951-1973 гг.)

	IY	У	УІ	УІІ	УШ	ІХ	Х	IY-X	XI-III	За год
C_v	0.54	0.41	0.46	0.39	0.47	0.38	0.33	0.15	0.24	0.12
$\pm \bar{b}$	25	23	36	32	35	26	23	72	54	83

ветствующий период 1972 г. Диапазон колебания сумм осадков за теплый и холодный периоды значительный (табл. 29).

В отдельные месяцы теплого периода какой-либо закономерности в изменении количества осадков проследить не удалось (табл. 30).

Количество осадков за 1951-1973 гг. было на 66 мм (9%) меньше, чем за многолетний период. Распределение их за холодный и теплый период – соответственно 32 и 68%. Коэффициент изменчивости в холодный период несколько больше (0.24), чем в теплый (0.15). В отдельные фазы водности годовые суммы осадков практически одинаковы, но имело место некоторое перераспределение их внутри года (рис. 20). За теплый период многоводной фазы (1951-1962 гг.) осадков выпадало несколько больше (70%), в маловодную (1963-1973 гг.), наоборот, меньше (65%).

Испарение с поверхности оз. Кубенского рассчитано по известной гидрометеорологической формуле ГГИ (1969):

$$E = 0.14 n (e_o - e_2) (1 + 0.72 u_2) \text{ мм/мес.}$$

Исходные параметры (абсолютная влажность – e_2 и скорость ветра – u_2 на горизонте 2 м) были взяты по ст. Коробово и уточнены с помощью данных рейдовой вертикали на озере, получаемых Вологодской ГМО, и материалов наблюдений экспедиции Института озероведения АН СССР над элементами приводного слоя в период 1972–1974 гг. Температура поверхности воды оз. Кубенского, необходимая для определения максимальной упругости водяного пара (e_0), заимствована из настоящей работы (разд. 5.4).

В настоящем разделе методики определения исходных данных для расчета испарения мы касаться не будем, поскольку она более подробно будет изложена в гл. 5 при определении потерь тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой поверхности оз. Кубенского. Здесь же приводятся величины испарения в мм слоя

как составляющей водного баланса за расчетный период (табл. 31). Как месячные, так и годовые, они изменяются в широких пределах. В период апрель–ноябрь с поверхности озера в месячных величинах преобладает испарение, хотя в отдельные более короткие периоды времени, особенно весной, имеет место конденсация водяного пара. В зимние месяцы (XII, I, II) в средних месячных величинах преобладает конденсация на поверхность озера, величины которой малы и их следует считать приближенными, поскольку данные о температуре поверхности озера, покрытого льдом и снегом, практически отсутствуют. Нами температура поверхности оз. Кубенского в период устойчивого ледостава принималась несколько ниже температуры воздуха, что является допущением (Копанев, 1967; Изотова, 1973). Невелика точность определения испарения и в переходные периоды (апрель, ноябрь).

Максимальная величина испарения с озера имела место в теплом 1970 г. (на 36% больше средней), а самая малая – в 1955 г. (на 30% ниже средней за расчетный период). Близкими к среднему по величине испарения были 1951, 1962 и 1973 гг. Изменчивость месячных величин в период интенсивного испарения значительна (табл. 32).

Озеро Кубенское относится к числу мелководных. С момента вскрытия температура поверхности воды повышается сравнительно

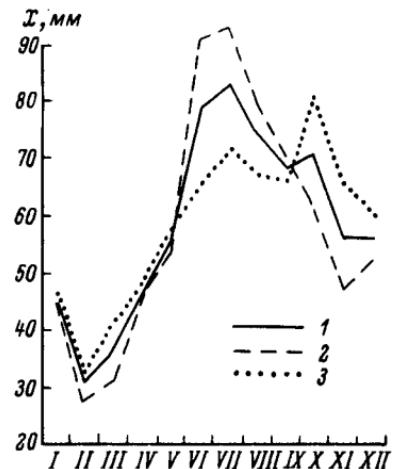


Рис. 20. Внутригодовое распределение осадков на озере.

1 – среднее за 1951–1973 гг.;
2 – среднее за 1951–1962 гг. (многоводная фаза); 3 – среднее за 1963–1973 гг. (маловодная фаза).

Таблица 31

Суммарные месячные и годовые величины испарения (в мм) с оз. Кубенского
за многолетний период (1951-1973 гг.)

Годы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1951	-4	-2	3	8	83	77	74	68	67	28	23	2	423
1952	0	-4	0	16	38	63	79	74	39	34	27	-1	355
1953	-6	-4	10	12	60	93	59	58	56	18	16	0	372
1954	-6	-2	12	24	17	46	90	65	50	19	33	0	348
1955	-4	-4	-4	22	37	38	72	69	44	19	18	-3	304
1956	-10	-14	9	20	45	77	62	55	52	33	18	0	344
1957	-2	2	2	18	48	54	69	61	52	24	28	0	356
1958	-7	-3	3	22	22	77	115	70	61	26	28	-8	406
1959	-6	2	13	24	75	70	106	107	48	32	14	-5	488
1960	-9	-4	2	28	81	105	119	100	45	34	11	0	512
1961	-12	-2	10	37	13	104	86	68	58	32	10	-4	400
1962	-4	0	5	19	63	98	84	74	50	17	18	-6	418
1963	-5	-3	-3	15	26	38	67	75	57	28	30	-6	319
1964	-15	-4	2	17	23	103	97	79	37	16	15	-5	367
1965	-10	-6	-2	32	32	78	118	66	59	28	15	-2	408
1966	-6	-5	-2	13	44	130	106	99	40	24	27	0	470
1967	-4	0	18	6	61	93	117	84	48	25	16	-5	459
1968	-6	-2	12	41	83	100	106	66	44	41	14	-4	495
1969	-2	2	6	14	46	111	86	116	50	30	17	-8	468
1970	-6	-2	10	29	74	118	130	98	57	36	18	0	562
1971	-7	-5	-2	40	54	92	98	89	51	34	14	-7	451
1972	-9	-4	-2	15	46	104	169	96	47	26	11	6	505
1973	-9	-6	5	10	69	90	129	55	38	32	21	-10	424
1974	2	13	16	32	13	97	113	57	54	24	34	7	462
Средняя	-6	-3	4	21	50	85	97	78	50	28	19	-3	420
Наибольшая	0	2	18	41	83	130	169	116	67	41	33	6	562
Наименьшая	-15	-14	-4	6	13	38	59	55	37	16	10	-10	304

быстро, и, следуя за ходом температуры воздуха, увеличивается и интенсивность испарения. Так, средняя величина испарения за май возрастает в 2.4 раза по сравнению с апрельской. Меньшей изменчивостью отличается испарение с поверхности озера в сентябре ($C_v = 0.16$). В многоводную фазу испарение с озера на 7% меньше, в маловодную – на 6% больше по сравнению со средней многолетней. Различия наблюдаются в период максимального нагрева (рис. 21). Как показали расчеты, 60% осадков, выпавших за год на озеро, расходуется на испарение с поверхности (табл. 33).

В среднем испарение с оз. Кубенского за апрель–октябрь составляет 97% от годового и 86% от осадков, выпавших за это время. В маловодную фазу испаряется 97%, в многоводную – 76% осадков, приходящих на поверхность озера за теплый период. По сравнению с величиной испарения за апрель–октябрь с поверхности оз. Кубенского, приведенной в „Ресурсах поверхностных вод СССР“ (1972), рассчитанная нами на 21% меньше. Практически таково же расхождение и с многолетней величиной испарения, приведенной А.Г. Прониным. Изменение величины испарения в разные фазы водности составило 6–7%, что несколько больше, чем отмечается в работах А.Г. Пронина (1970) и В.П. Нехайчика (1971).

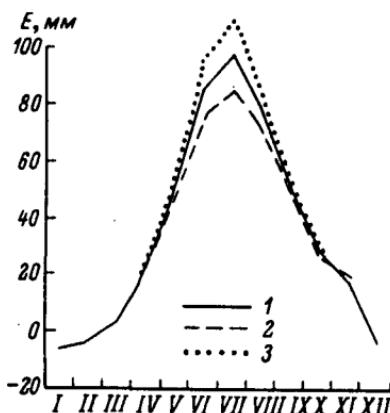


Рис. 21. Испарение с поверхности озера.

1 – среднее за 1951–1973 гг. (полный цикл увлажненности); 2 – среднее за 1951–1962 гг. (многоводная фаза); 3 – среднее за 1963–1973 гг. (маловодная фаза).

Таблица 32

Коэффициент изменчивости (C_v) и среднеквадратическое отклонение (δ , мм) месячных величин испарения за многолетний период (1951–1973 гг.)

	IY	Y	YI	YII	VIII	IX	X	XI	IY-II
C_v	0.48	0.45	0.28	0.28	0.25	0.16	0.24	0.34	0.15
$\pm \delta$	9	21	24	26	19	8	6	11	64

Таблица 33

Осадки и испарение с оз. Кубенского
за различные периоды

Период	XI-III			IY-X			I-XII		
	осад- ки, мм	испарение		осад- ки, мм	испарение		осад- ки, мм	испарение	
		мм	% от осад- ков		мм	% от осад- ков		мм	% от осад- ков
1951-1973 гг.	224	12	5	476	410	86	700	420	60
1951-1962 гг.	203	14	7	495	380	76	698	394	56
1963-1973 гг.	246	8	3	454	440	97	700	448	64

О диапазоне колебания годовых величин испарения с оз. Кубенского можно судить по приведенным ниже величинам.

Обеспечен-

ность, % ...	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
Испарение, мм	550	530	490	460	440	425	405	380	355	325	310

Из внутригодового распределения испарения с оз. Кубенского видно, что на июнь-август приходится 60% его суммарной величины за период апрель-ноябрь, что, по-видимому, свойственно мелководным водоемам умеренной зоны.

IY U VI VII UШ IX X XI

Испарение, % от суммы за IV-XI	5	12	20	22	18	12	7	4
-----------------------------------	---	----	----	----	----	----	---	---

Суммарная величина и распределение испарения с поверхности озера сходны с аналогичными величинами для малых водоемов рассматриваемого района, приведенными в Материалах междуведомственного совещания (1969).

В теплые периоды лет экспедиционных исследований (1972-1974 гг.) и многоводного 1966 г., характеризующиеся своеобразными погодными условиями (гл. 2, наст. изд.), испарение с поверхности оз. Кубенского протекало с различной интенсивностью. В летние месяцы (VI-VIII) оно было больше среднего многолетнего на 42% в 1972 г., на 5% в 1973 г. и на 3% в 1974 г.; в теплую весну 1973 г. - больше среднего многолетнего (на 11%), а в холодную 1974 г. - значительно меньше (на 37%). Холодные осенние месяцы 1973 г. и, наоборот, теплые 1974 г. сказа-

лись на величине испарения в меньшей степени: ее изменение в отклонениях от средней составило соответственно 6 и 16%. В много-водный 1966 г., теплый период (IV-XI) которого по термическим условиям был близким к среднему, испарение с озера на 13% превышало среднюю величину.

3.3. Водный баланс

Первые сведения о водном балансе оз. Кубенского были опубликованы в Трудах Всесоюзного симпозиума по проблемам пресноводных озер. В статье А.Г. Пронина (1970), посвященной изучивости водного баланса крупных озер Северо-Запада европейской части СССР, приведены данные по двадцати озерам. Для некоторых крупных, таких как Ладожское, Онежское, Ильмень и другие, сведения о водном балансе заимствованы автором из литературных источников, для большинства же менее крупных, в том числе и Кубенского, водные балансы рассчитаны непосредственно им самим. Поскольку основная задача в упомянутой статье состояла в выявлении изменчивости водного баланса по территории, для автора наиболее важно было выбрать единую методику расчета с целью сравнимости получаемых данных, в уточнении же и анализе отдельных составляющих водного баланса для каждого озера особой нужды не возникало.

Рассчитанный им за период 1881-1963 гг. водный баланс оз. Кубенского отнесен к площади озера, равной 407 км², что соответствует отметке уровня 109.7 м, которая превышает среднюю многолетнюю на 30 см. Это обстоятельство следует тем более подчеркнуть, что у оз. Кубенского в зависимости от отметки его уровня значительно меняются размеры площади и объема (разд. 3.4, наст. изд.), и, следовательно, элементы водного баланса, выраженные в слое воды, могут менять свое значение в зависимости от той площади, к которой отнесены. Приток в озеро, по данным указанной выше работы, составил 10063 мм, сток из озера - 10305 мм. Сумма атмосферных осадков на поверхность озера, вычисленная с учетом поправок, рекомендованных Главной геофизической обсерваторией, но по данным единственной метеорологической станции, оказалась равной 768 мм, а испарение - 568 мм. Общий приход воды в озеро и расход из него составили 10831 мм.

Два года спустя данные по водному балансу оз. Кубенского были опубликованы в Ресурсах поверхностных вод (1972), где прямо указывалось, что они носят ориентировочный характер как из-за недостаточного освещения измерениями поверхностного притока, так и из-за невысокой точности исходных данных для расчета осадков на зеркало озера и потеря на испарение. Водный баланс оз. Кубенского приведен, как указано в работе, для осредненного года без уточнения периода, для которого проводилось осреднение. По данным этого источника, общий приход воды в озеро составил

$4797 \cdot 10^6$ м³ (из них 93.8% – приток в озеро и 6.2% – атмосферные осадки). Если перевести эти данные в слой воды, выраженный в мм, то для площади озера, равной 407 км² (как там указано), приходная часть водного баланса составит величину 11785 мм, что больше вышеприведенной на 954 мм.

Водный баланс оз. Кубенского, который приводится в Ресурсах поверхностных вод (1972), имеет довольно значительную невязку. Расходная часть водного баланса меньше приходной на $366 \cdot 10^6$ м³. Эта величина превышает годовую сумму атмосферных осадков и в полтора раза больше испарения, однако авторы не пытаются выяснить, что послужило источником такой большой невязки. Сейчас, правда, уже установлено, что и атмосферные осадки и испарение вне зависимости от их точности не оказывают существенного воздействия на изменение объемов приходной и расходной частей водного баланса. К тому же сток из озера, осуществляемый по одной реке, на которой ведутся постоянные наблюдения, может быть рассчитан достаточно точно. Следовательно, источник ошибок в величине водного баланса следует искать скорее всего в величине речного притока в озеро, и, как будет показано далее, он оказался значительно завышенным.

Как было указано выше, одной из причин несоответствия в составляющих водного баланса может быть неодинаковый период, выбранный для расчета разными авторами. Поэтому дальнейшее уточнение водного баланса оз. Кубенского должно заключаться как в более тщательном расчете отдельных элементов водного баланса, так и в обосновании расчетного периода.

В настоящее время в литературеочно утверждилась теория о циклическом характере колебаний основных компонентов, определяющих водный баланс озер. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе периода для определения средних многолетних величин. В работе А.В. Шнитникова (1966), посвященной исследованию колебаний общей увлажненности бассейнов Северо-Запада европейской части СССР, анализируются колебания уровня крупных озер Прибалтики. Состояние уровня озер непосредственно зависит от стока питающих рек, а последний – от соотношения условий выпадения атмосферных осадков и режима температуры воздуха в бассейнах. По анализу колебания уровня озер и стока рек бассейна Ладожского озера за истекшее столетие А.В. Шнитниковым выделено три полных внутривековых цикла продолжительностью 25–33 года. Каждый цикл включает многоводную и маловодную фазу. Анализ уровенного режима и стока р. Сухоны, данные по которым имеются с 1880 г. (разд. 3.1 и 3.4, наст. изд.), позволил выделить подобные циклы и для бассейна оз. Кубенского. Последний из этих циклов, продолжавшийся с 1951 по 1973 г., и принят нами в качестве расчетного периода для определения среднего многолетнего водного баланса озера. Кроме средних многолетних, рассчитаны величины водного баланса отдельно для многоводной и маловодной фаз этого цикла, а также для экстремальных лет. В дальнейшем по вычисленному процентному соотношению сос-

тавляющих водного баланса за последний цикл увлажнения, которое предположительно должно выдерживаться при любых средних многолетних величинах, сделана попытка рассчитать водный баланс оз. Кубенского за более длительное время. Основой для таких расчетов послужили наблюдения над стоком р. Сухоны с 1880 г. И, наконец, несколько подробнее освещен водный баланс для лет работы на озере комплексной экспедиции Института озероведения АН СССР, т.е. для 1972-1974 гг.

Для расчета водного баланса было принято следующее уравнение:

$$Y_{np} + X \pm Y_{подз} - Y_{стк} - Z = \pm \Delta H,$$

где Y_{np} – речной приток, X – осадки, $Y_{подз}$ – подземный приток и сток, $Y_{стк}$ – сток из озера, Z – испарение, ΔH – приращение уровня (сработка или аккумуляция).

Средняя многолетняя величина притока в озеро за период 1951-1973 гг., по данным В.А. Кирилловой (разд. 3.1, наст. изд.), равна 4.101 км³, или 10252 мм, будучи выражена в слое на площадь озера. Около 80% этой величины составляет сток р. Кубены, который определен по фактическим данным. Наблюденные данные по притоку малых рек охватывали лишь 25% водосборной площади. Поэтому приток с остальной части территории определялся по графикам связи, что, естественно, несколько уменьшило точность расчета суммарного речного притока в озеро. Значительно точнее – по данным непосредственных наблюдений – определен сток воды из озера по р. Сухоне, который в среднем многолетнем выражении составил 4.213 км³, или 10532 мм.

Осадки (разд. 3.2, наст. изд.) рассчитаны по данным десяти метеорологических станций, расположенных в бассейне озера, с введением всех необходимых поправок и соотнесены с площадью озера. Испарение (разд. 3.2, наст. изд.) рассчитано с помощью формулы ГГИ по гидрометеорологическим элементам, приведенным к водной поверхности.

Для характеристики режима годового накопления воды в озере были выполнены расчеты годового хода наполнения озера на основе уровенных наблюдений. Величина приращения уровня вычислялась на первое число каждого месяца и на 1 января каждого года. Для исключения денивелационных колебаний при определении уровня на 1-е число каждого месяца пользуются разными методами. В данной работе уровень рассчитывался как среднеарифметическое значение из отметок 5 последних дней предыдущего месяца и 5 первых дней последующего. На оз. Кубенском действуют два водомерных поста (д. Пески и д. Коробово), для каждого из которых вычислялись уровни на 1-е число. В расчет водного баланса вводились приращения уровня, осредненные по этим двум постам.

Таблица 34

Водный баланс оз. Кубенского за многолетний период

Год	Приход, км ³				Расход, км ³				Невязка	
	приток	осадки	сработка	сумма	сток	испарение	аккумуляция	сумма	км ³	%
1951	4.100	0.238	0.171	4.509	4.762	0.168	-	4.930	-0.421	-9.3
1952	3.910	0.316	-	4.226	3.311	0.148	0.673	4.132	+0.094	+2.2
1953	5.203	0.311	0.246	5.760	5.834	0.160	-	5.994	-0.234	-4.1
1954	3.784	0.240	-	4.024	3.103	0.137	0.080	3.320	+0.704	+17.4
1955	6.181	0.298	0.368	6.847	6.244	0.118	-	6.362	+0.485	+7.1
1956	3.784	0.283	-	4.067	3.880	0.136	0.116	4.132	-0.065	-1.6
1957	6.150	0.312	-	6.462	5.803	0.143	0.283	6.229	+0.233	+3.6
1958	5.046	0.266	0.360	5.672	5.393	0.165	-	5.558	+0.114	+2.0
1959	4.100	0.264	0.196	4.560	4.604	0.196	-	4.800	-0.240	-5.2
1960	2.556	0.252	0.031	2.839	2.772	0.195	-	2.967	-0.128	-4.5
1961	6.150	0.290	-	6.440	5.708	0.158	0.125	5.991	+0.449	+7.0
1962	5.368	0.304	-	5.672	5.487	0.168	0.250	5.905	-0.233	-4.1
1963	2.643	0.215	0.271	3.129	3.217	0.123	-	3.340	-0.211	-6.7
1964	2.961	0.268	-	3.229	3.217	0.140	-	3.357	-0.128	-4.0
1965	3.530	0.259	0.031	3.820	3.784	0.157	-	3.941	-0.121	-3.2
1966	6.246	0.376	-	6.622	6.565	0.190	0.062	6.817	-0.195	-2.9
1967	3.141	0.296	0.056	3.493	3.437	0.175	-	3.612	-0.119	-3.4
1968	4.005	0.294	-	4.299	4.384	0.198	0.008	4.590	-0.291	-6.7
1969	4.825	0.297	-	5.122	4.510	0.185	0.559	5.254	-0.132	-2.6
1970	2.699	0.219	0.788	3.706	3.122	0.224	-	3.346	+0.360	+9.7
1971	3.005	0.273	-	3.278	2.958	0.177	0.096	3.231	+0.047	+1.4
1972	2.738	0.220	0.046	3.004	2.639	0.197	-	2.836	+0.168	+5.6
1973	2.209	0.294	0.066	2.569	2.148	0.161	-	2.309	+0.260	+10.1

Водный баланс оз. Кубенского приведен к среднему многолетнему уровню, равному 109.4 м. Площадь озера, соответствующая этому уровню, — 400 км². Приходную часть водного баланса озера составляют атмосферные осадки, выпадающие на его водное зеркало, и речной сток. Общий приход в озеро равен 4.015 км³, общий расход из него — 4.381 км³, т.е. разница между расходом и приходом, или невязка баланса, равна 0.064 км³. Совершенно очевидно, что раз не происходит прогрессивного понижения уровня озера, то расход воды из него не может преобладать над приходом. Что же является источником невязки?

Некоторые авторы разницу между приходной и расходной частями водного баланса относят за счет неучтенного подземного притока, определить который непосредственно пока еще очень трудно. Но для оз. Кубенского такое объяснение вряд ли верно, так как, если рассмотреть водные балансы за каждый год расчетного периода (табл. 34) и оценить годовые невязки баланса, можно заметить, что они меняются от года к году не только по величине, но и по знаку, а значит, причину невязки баланса не следует искать в недоучете подземного притока — достаточно консервативного элемента. Кроме того, оз. Кубенское мелководное и в него не могут поступать глубоко залегающие подземные воды. Поступление же вод, заключенных в толще грунтов, которое вполне возможно, учитывается в суммарном стоке рек, дренирующих водосборный бассейн. Следует учесть также, что для озер Северо-Запада, где хорошо развита речная сеть, роль грунтового стока, попадающего в озеро непосредственно, в водном балансе невелика. Так, для Ладожского озера непосредственный грунтовый сток не достигает и 2% приходной части водного баланса (Малинина, 1966), а для Рыбинского водохранилища, расположенного недалеко от оз. Кубенского, он еще меньше — 0.9% (Бакастов, 1959).

Вышеприведенные соображения подсказывают, что разницу между приходной и расходной частями водного баланса оз. Кубенского целесообразнее отнести не за счет грунтового стока, а за счет суммарного речного притока. Именно этот элемент водного баланса определяется менее точно, чем остальные. Сток малых рек, где мало наблюдений, или они вовсе отсутствуют, рассчитывался по графикам связи, и, видимо, отсюда большие невязки в водном балансе за отдельные годы. Однако в многолетнем ходе имеющие разные знаки, они постепенно нивелируются, и в результате за 23-летний период невязка водного баланса составляет всего лишь 0.064 км³, или всего 1.5% от приходной части. Следовательно, увеличив приходную часть водного баланса на 0.064 км³, получим уточненный водный баланс оз. Кубенского (табл. 35).

Главной составляющей приходной части баланса является поверхностный приток (93.6%). Менее 7% составляют осадки. В расходной части баланса подавляющая часть (96.2%) падает на сток воды из озера и только около 4% составляет испарение. Для расчетного периода сток из оз. Кубенского преобладает над при-

Таблица 35

Водный баланс оз. Кубенского за многолетний период
(1951-1973 гг.)

Приход	Объем, $\times 10^6 \text{ м}^3$	Слой, мм	%	Расход	Объем, $\times 10^6 \text{ м}^3$	Слой, мм	%
Речной приток	4101	10252	93.6	Сток из озера	4213	10532	96.2
Осадки	280	700	6.4	Испарение	168	420	3.8
Сумма	4381	10952	100	Сумма	4381	10952	100

током примерно на 3%. В то же время второй элемент расходной части баланса – испарение – составляет лишь две трети от атмосферных осадков. Но ни осадки, ни испарение не играют существенной роли в водном балансе оз. Кубенского. Колебание значений расходной и приходной частей баланса по годам определяется прежде всего колебанием в величинах притока и стока из озера.

В течение первой половины расчетного периода (1951-1962 гг.) приходная часть водного баланса почти за каждый год превышала среднее многолетнее значение либо была близка к норме (рис. 22). Исключение составляет маловодный 1960 г. с обеспеченностью годового стока рек около 85%. Хотя атмосферных осадков в 1960 г. выпало всего на 10% меньше средней многолетней величины, а испарение увеличилось по сравнению с нормой только на 20%, приток воды в озеро в этом году был весьма небольшим: примерно в два раза меньше среднего значения. Такое сокращение притока воды в озеро и определило уменьшение приходной части водного баланса в 1960 г., значительно отличавшегося от других лет первой половины расчетного периода, которая в целом составляет многоводную фазу внутривекового цикла (1951-1973 гг.) общей увлажненности.

Другая тенденция намечается после 1962 г. Почти в течение всех лет второй половины расчетного периода объем расходной части водного баланса преобладает над приходной, что постепенно приводит к значительному снижению уровня оз. Кубенского. Эти годы (1963-1973 гг.) составляют маловодную фазу расчетного периода. Однако и в ней резко выделяется 1966 г., который является самым многоводным (обеспеченность 4%) за весь период 1951-1973 гг.

Из литературы известно (Шнитников, 1966; Нехайчик, 1964, и др.), что в многоводную фазу могут входить отдельные годы, когда приток воды в озеро оказывается значительно ниже нормы, а в маловодную – выше нормы. Но, как правило, экстремаль-

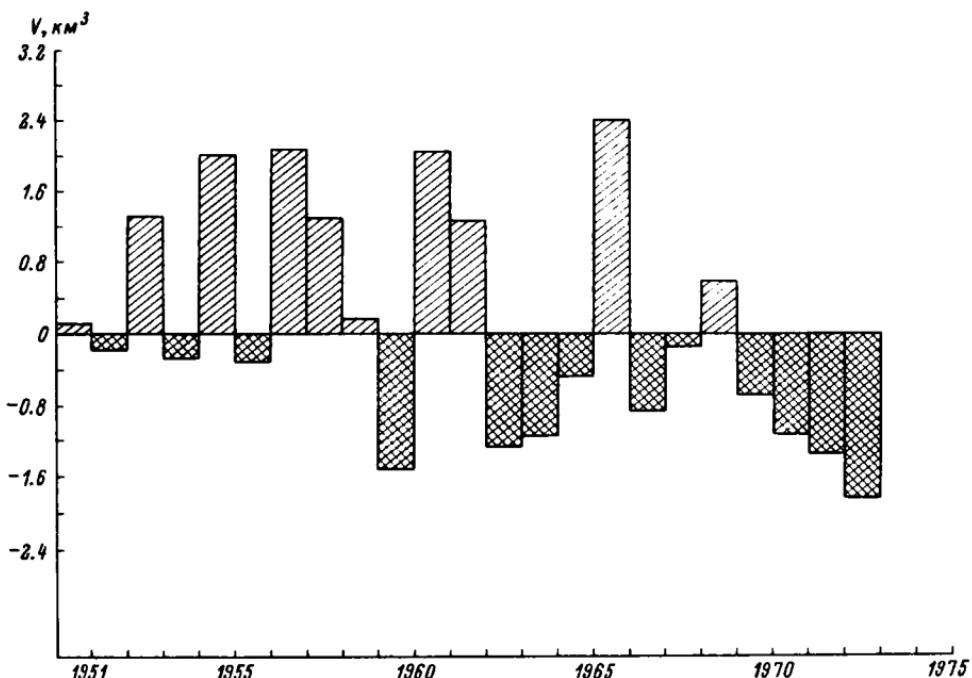


Рис. 22. Объем приходной части водного баланса озера в отклонениях от нормы.

ные годы, как многоводный, так и маловодный, имеют место только в „своей“ фазе. Однако для оз. Кубенского как маловодный, так и многоводный годы оказалась в одной маловодной фазе внутривекового цикла увлажненности (1951–1973 гг.). С целью получения характеристики этих фаз для каждой из них в отдельности был рассчитан водный баланс (табл. 36). Невязка водного баланса для отдельных фаз увлажненности составила около 1% от его приходной части. В многоводную фазу приходная часть баланса оказалась больше расходной на 0.052 км^3 , а в маловодную, наоборот, приходная часть была меньше расходной на 0.0051 км^3 . Эти невязки, так же как и для всего периода увлажненности, отнесены к величине притока воды в озеро.

Объем приходной части водного баланса за многоводную фазу оказался больше средней годовой величины примерно на 12%. Причиной этому послужило увеличение притока воды в озеро на 13%, в то время как сумма атмосферных осадков за многоводную фазу осталась примерно той же, что и за весь расчетный период. В расходной части баланса за эту фазу сток р. Сухонь увеличился на 12.6% по сравнению со средней многолетней величиной, а испарение уменьшилось на 7%. Многоводная фаза характеризуется более

Таблица 36

Водный баланс оз. Кубенского за отдельные фазы

Составляю- щая баланса	Многоводная фаза (1951- 1962 гг.)			Маловодная фаза (1963-1973 гг.)		
	объем, $\times 10^6 \text{ м}^3$	слой, мм	%	объем, $\times 10^6 \text{ м}^3$	слой, мм	%
Приход						
Речной при- ток	4643	11762	94.4	3455	8958	91.9
Осадки	281	698	5.6	274	700	7.3
Сработка уровня	-		-	29	80	0.8
Сумма	4924	12560	100	3758	9638	100
Расход						
Сток из озера	4742	11885	96.1	3583	9190	95.4
Испарение	158	391	3.4	175	448	4.6
Аккумуля- ция	24	60	0.5			
Сумма	4924	12560	100	3758	9638	100

прохладными и влажными погодными условиями, что сказывается на уменьшении испарения с поверхности озера и повышении сумм атмосферных осадков, выпадающих в бассейне озера и увеличивающих речной сток в него. Именно поэтому роль основных составляющих водного баланса – притока и стока – в многоводную фазу увеличивается (до 94 и 96%), а роль второстепенных – осадков и испарения – уменьшается. Почти постоянное преобладание приходной части баланса над расходной в многоводную фазу привело к аккумуляции воды в озере и повышению отметки его уровня к концу фазы на 65 см.

В маловодную фазу поступление воды в озеро несколько сокращается. Речной приток уменьшается на $646 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, т.е. на 16% по сравнению со средней многолетней величиной, а сток – на $730 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или 17%. И хотя сумма осадков на поверхность озера остается без изменения, а испарение увеличивается всего на $7 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, в целом объем приходной части водного баланса в маловодную фазу уменьшается на 14.3% по сравнению с приходной частью водного баланса за весь расчетный период. Харак-

Т а б л и ц а 37

Водный баланс (в мм) оз. Кубенского за многоводный 1966 г.

Составляющая баланса	I	II	III	IV	V	V1	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
П р и х о д													
Поверхностный приток	213	106	91	4255	6611	942	258	167	502	1489	426	137	15197
Осадки	77	48	99	116	93	60	45	122	97	80	31	47	915
Сработка уровня	160	90	-	-	-	1500	1080	740	380	-	680	530	5160
Сумма	450	244	190	4371	6704	2502	1383	1029	979	1569	1137	714	21272
Р а с х о д													
Сток	504	199	111	429	5761	2254	1178	960	842	1243	1286	784	15675
Испарение	-6	-5	-2	5	44	130	106	99	40	24	27	0	462
Аккумуляция	-	-	40	4100	940	-	-	-	-	230	-	-	5310
Сумма	498	194	149	4536	6745	2384	1284	1059	882	1497	1313	784	21347
Невязка, мм	-48	+50	+41	-175	-41	+118	+99	-30	+97	+72	-176	-70	-75
%	-10	+19	+19	-4	-1	+9	+7	-3	+10	+4	-15	-9	0.4

Таблица 38

Водный баланс (в мм) оз. Кубенского за маловодный 1973 г.

Составляющая баланса	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Приход													
Поверхностный приток	126	83	111	3315	1125	140	89	86	159	304	181	109	5828
Осадки	43	77	46	75	26	80	33	77	84	99	75	62	779
Сработка уровня	110	-	-	-	-	560	660	560	420	280	270	160	3020
Сумма	279	160	157	3390	1151	780	782	723	663	683	526	331	9627
Расход													
Сток	222	84	106	809	963	611	572	580	597	544	468	191	5747
Испарение	-9	-6	5	10	69	90	129	55	38	32	23	-10	426
Аккумуляция	-	-	20	2820	30	-	-	-	-	-	-	-	2870
Сумма	213	78	131	3639	1062	701	701	635	635	576	491	181	9043
Невязка, мм	+66	+82	+26	-249	+89	+79	+81	+88	+28	+107	+35	+150	+584
" %	+23.6	+51	+16.6	-7.5	+11	+10	+10.3	+12.1	+4.2	+15.6	+6.6	+4.5	+5.8

терным для маловодной фазы является повышение роли второстепенных составляющих водного баланса: доля атмосферных осадков увеличилась до 7.3% от приходной части водного баланса, а испарения – до 4.6% от расходной части. Систематическое уменьшение притока воды в озеро в маловодную фазу привело к тому, что накопленные в предыдущие годы запасы озерной воды оказались израсходованными на сток р. Сухоны. Уровень озера падал в среднем на 8 см в год, что к концу маловодной фазы составило 96 см. Наибольшее снижение уровня воды происходило в течение 1970 г. и достигло 189 см. В декабре 1970 г. средний месячный уровень озера был на 150 см ниже среднего многолетнего декабрьского уровня. И в последующие годы до конца расчетного периода уровень продолжал падать.

В экстремальные годы обнаруживается еще большее отклонение значений составляющих водного баланса от их средних величин. Самым многоводным годом за расчетный период был 1966, в то же время он был и самым холодным (гл. 2). В этом году произошло значительное увеличение объема всех составляющих баланса (табл. 37): поверхностный приток увеличился на 2.5 км³ и составил 150% от средней многолетней величины, на 215 мм увеличилась сумма атмосферных осадков. Общий объем приходной части баланса за многоводный 1966 г. увеличился на 33% по сравнению со средней величиной за весь цикл (1951–1973 гг.). Большая часть воды поступила в озеро в период половодья: приток за апрель и май, если перевести его в слой на поверхность озера, составит более 10000 мм. Значительно выше нормы, особенно в мае, был сток из озера. Средний годовой уровень в 1966 г. был выше среднего многолетнего на 37 см.

Самым маловодным за расчетный период был 1973 г. Ему предшествовал целый ряд маловодных лет, в течение которых объем приходной части водного баланса был все время ниже нормы. Наибольшее уменьшение объема приходной части водного баланса (табл. 38) – более чем на 40% по сравнению со средней многолетней величиной – произошло в 1973 г., что вызвало падение уровня озера до отметки 108.86 м.

В экстремальные годы значительно изменяются не только величины составляющих водного баланса, но и их процентные соотношения в приходной и расходной частях. В многоводный год доля притока и стока увеличилась до 95 и 97%. Роль же атмосферных осадков, несмотря на их увеличение почти на четверть по сравнению со средней многолетней величиной, снизилась и составила всего 5% приходной части баланса. Доля испарения в расходной части баланса в многоводный год уменьшилась до 2.8%, хотя абсолютная величина возросла на 44 мм. В маловодный год наблюдается обратное соотношение. Роль притока и стока несколько снижается, доля же атмосферных осадков увеличивается до 12% (т.е. вдвое) приходной части баланса, а испарение – до 8% расходной части.

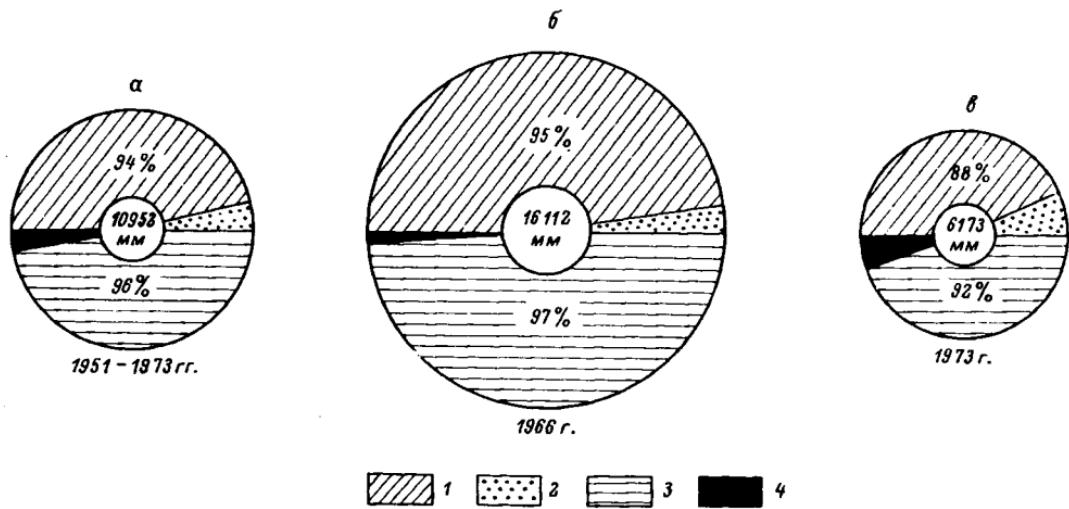


Рис. 23. Водный баланс озера за многолетний период и экстремальные годы (б, в).

1 - речной приток, 2 - осадки, 3 - сток, 4 - испарение.

Т а б л и ц а 39

Водный баланс (в мм) оз. Кубенского за 1951-1973 гг.

Составляющая баланса	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Приход												
Поверхностный приток	171	141	135	2731	3585	852	341	359	407	716	564	253
Осадки	45	31	36	47	56	78	83	74	68	70	56	56
Сработка уровня	300	160	30	-	-	610	600	600	470	200	250	400
Сумма	516	332	201	2778	3638	1540	1024	1033	945	986	870	709
Расход												
Сток (через Сухону)	440	250	194	309	2696	1444	901	976	872	928	882	640
Испарение	-6	-3	5	14	50	85	97	78	50	28	25	-3
Аккумуляция	-	-	-	2530	1090	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	434	247	199	2853	3836	1529	998	1054	922	956	907	637
Невязка, мм	+82	+85	+2	-75	-198	+11	+26	-21	+23	+30	-37	+72
%	+16	+25	+1	-2.7	-8.2	+0.8	+2.6	-2.1	+2.4	+3.0	-4.2	+10

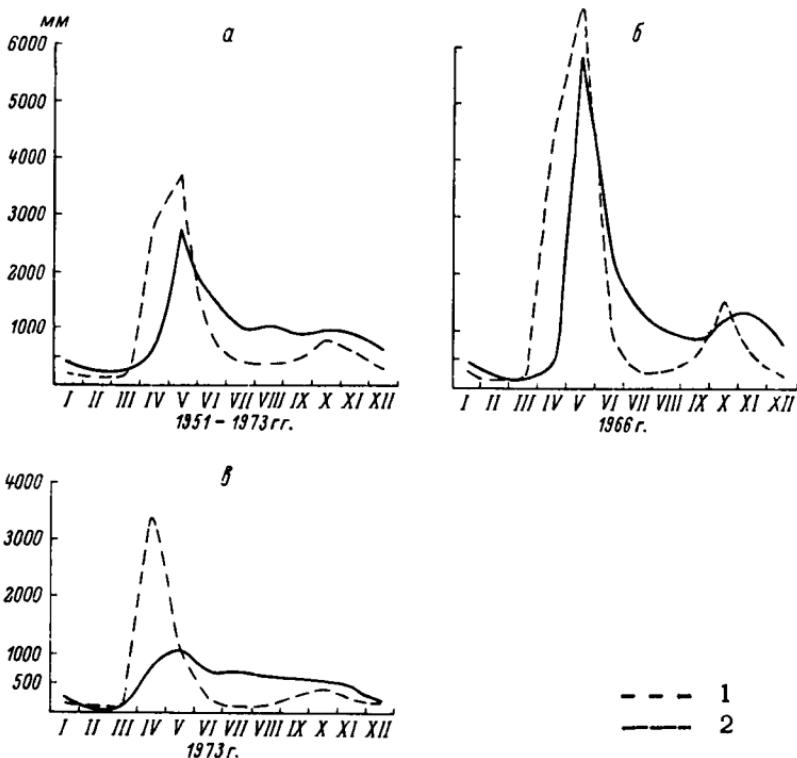


Рис. 24. Суммарный приход (1) и расход (2) озера за многолетний период (а) и экстремальные годы (б, в).

Если сопоставить водные балансы экстремальных лет между собой, то можно заметить, что объем приходной части баланса за многоводный год в три раза больше, чем за маловодный (рис. 23). Для оз. Кубенского это соотношение имеет большое значение, поскольку объем воды, участвующей, в ежегодном круговороте, в несколько раз превышает объем самого озера. Так, средняя многолетняя величина приходной части баланса в четыре раза больше объема озера. В маловодный год это соотношение снижается до 2.5, а в многоводный – возрастает до 6.

Переходим к рассмотрению внутригодового распределения составляющих водного баланса (табл. 39).

У водных балансов, составленных за отдельные месяцы, т.е. за сравнительно короткие промежутки времени, несколько возрастает величина невязки. Наибольшее расхождение между приходной и расходной частями – у балансов первых месяцев года. По расчетам, в эти месяцы приходная часть баланса больше расходной, и уровень озера должен был бы повышаться, а он фактически падает. Ошибка в расчетах заключается, по-видимому, в том, что

осадки, выпадающие в твердом виде, не участвуют в водообороте озера непосредственно в этом месяце (а их величина достигает 30% общего прихода воды), а накапливаются в течение всей зимы. В то же время в апреле расход воды из озера, по нашим расчетам, превышает приход, но уровень, вместо того чтобы падать, растет. Вероятно, в апреле с началом таяния снега значительное количество воды в озеро поступает и в виде склонового стока, не учтенного в расчетах.

В течение года поступление воды в озеро происходит крайне неравномерно (рис. 24). Наибольший поверхностный приток наблюдается в мае (33% от годовой величины) и затем в апреле. Всего за апрель и май в озеро стекает более половины (58%) годовой величины приходной части водного баланса, что приводит к сильному повышению (в среднем на 3,5 м) его уровня. Меньше всего воды в озеро поступает в марте: всего 2% от годовой величины. Наибольшие месячные величины в расходной части баланса приходятся на май и июнь. За эти два месяца из озера уходит более 40% воды, поступившей в него в течение года.

Максимальный средний месячный приход воды в озеро в 20 раз превышает минимальный. В расходной части баланса это соотношение составляет 16. Подобные цифры свидетельствуют об очень малой зарегулированности озера. Если рассмотреть подобные величины для больших озер, скажем, Ладожского, то соотношение максимального месячного прихода к минимальному составляет немногим более двух, что свидетельствует о большой естественной зарегулированности озера. Такая зарегулированность является следствием, во-первых, того, что водосбор Ладожского озера занимает огромную территорию, и таяние снега на водосборах северных и южных притоков происходит со значительным сдвигом в сроках. А во-вторых, и это главное, площадь озера очень велика, что способствует распластыванию паводковых вод. Во время половодья (май–июнь) в озеро поступает 8–10 km^3 воды, или 500–600 мм слоя на поверхность озера.

В оз. Кубенское, которое в 40 раз меньше Ладожского, в весенние месяцы (апрель–май) приходит около 60% всей воды, поступающей за год, что составляет слой более 4 м, т.е. в 10 раз больше, чем в Ладожское. Большая зарегулированность Ладожского озера способствует тому, что сток Невы характеризуется малой изменчивостью. На оз. Кубенском большое количество воды, поступившее за сравнительно короткое время, значительно повышает уровень озера и резко увеличивает сток р. Сухоны. Вероятно, сток р. Сухоны в мае и июне был бы еще больше, если бы не регулировался плотиной у шлюза „Знаменитого“, находящегося в 7,5 км от истока реки.

Обычно в мае приходная часть баланса равна расходной, что соответствует максимальному месячному уровню воды. Начиная с июня расходная часть водного баланса превышает приходную, и уровень воды от месяца к месяцу до конца года падает. Даже

почти ежегодное увеличение приходной части баланса в октябре за счет дождевых паводков не приводит к повышению среднего месячного октябрьского уровня, так как в целом за месяц расход воды из озера преобладает над приходом. Разумеется, эти рассуждения основаны на анализе средних многолетних месячных величин, в то время как в отдельные конкретные годы описанные закономерности могут нарушаться.

Наибольшие различия в годовом ходе составляющих водного баланса по сравнению со средними многолетними значениями приходятся на экстремальные годы. В многоводный 1966 г. (рис. 23) максимальный месячный суммарный приход воды в озеро наблюдался, как и обычно, в мае, но величина его в два раза превышала среднюю многолетнюю для данного месяца. За два весенних месяца (апрель, май) озеро приняло 63% всей воды, поступающей за год, что составило слой на поверхности озера величиной в 11 м. И хотя сток воды из озера в период половодья также значительно превышал норму, уровень озера в апреле повысился на 4 м и продолжал повышаться в мае. В результате средняя месячная отметка уровня в мае достигла величины 113,07 м. Минимальный приход воды в озеро в 1966 г. приходится на март. Соотношение максимального и минимального месячного поступления воды в озеро достигает 35. Следует заметить, что многоводность 1966 г. определялась не только большим поступлением воды за счет весеннего половодья, но и за счет осенних паводковых вод. В октябре этого года в озеро попало воды в три раза больше, чем в среднем за многолетний период.

Отличие годового хода составляющих водного баланса в маловодном 1973 г. заключалось в том, что максимальное за месяц поступление воды в озеро наблюдалось в апреле, а не мае, как обычно, и в том, что величины элементов водного баланса в этом году были значительно меньше, чем в среднем за многолетний период. Так, объем воды, поступившей за время весеннего половодья, был на 30% меньше, чем его среднее многолетнее значение. Сравнительно небольшое количество воды, поступившей в озеро за время половодья в 1973 г., было в значительной степени искусственно задержано в озере для обеспечения судоходства по р. Сухоне. Поэтому сток из озера за май был в три раза меньше средней величины за этот месяц, но зато в последующие летние месяцы сток озера составлял 50–60 см в слое воды, т.е. всего примерно на 25% меньше средних многолетних величин. Однако обеспечивалася этот сток за счет запасов воды озера, что и привело к значительному падению уровня, средняя годовая отметка которого была на 54 см ниже средней многолетней отметки.

Следует несколько подробнее рассмотреть водный баланс за период 1972–1974 гг., т.е. за годы, когда работала комплексная экспедиция Института на оз. Кубенском, и все элементы водного баланса за эти годы были определены более точно (рис. 25).

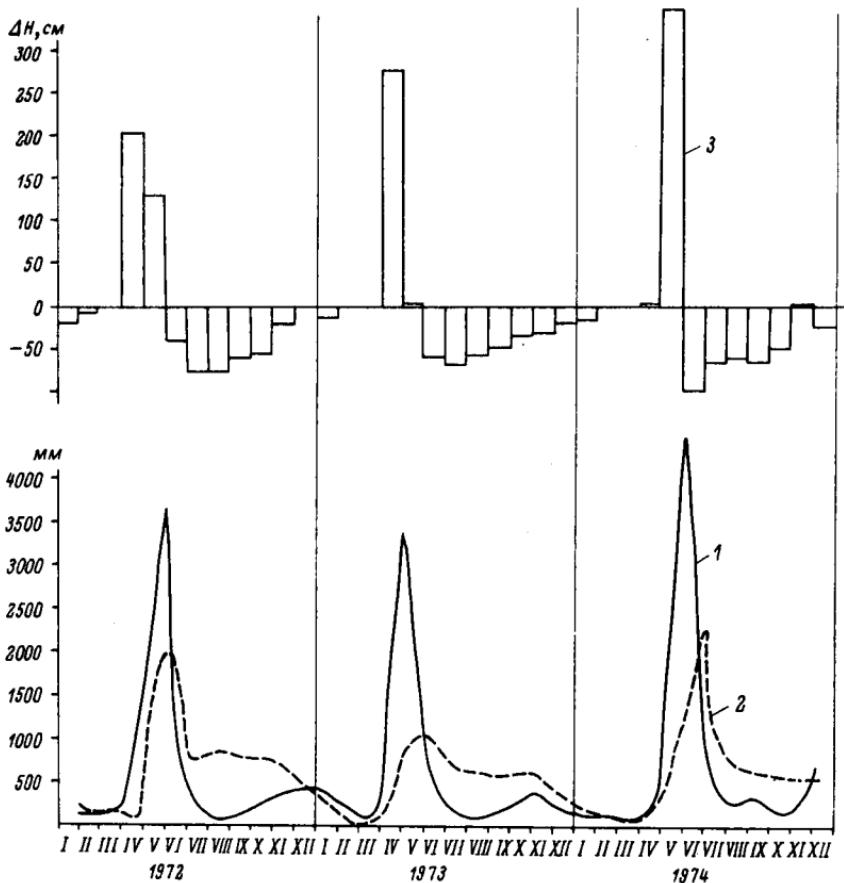


Рис. 25. Суммарный приход (1), расход (2) и приращение уровня (3) озера за годы работы экспедиции.

Все три упомянутые года являются маловодными годами с обеспеченностью годового стока рек 60–96%, среди них самый маловодный за весь многолетний период – 1973. Объем как приходной, так и расходной частей баланса был меньше средней многолетней величины в 1972 г. – на 30%, в 1973 – на 43%, а в 1974 – на 22%. В 1972 г. ход составляющих водного баланса в общих чертах повторяет ход средних многолетних месячных величин, однако поступление воды в весенний период было меньше нормы, что значительно снизило сток р. Сухоны за этот месяц. В летние месяцы поступление воды также было ниже средних многолетних значений, что привело к постепенной сработке запасов воды и понижению его уровня. Следующий год – 1973 – был самым маловодным не только за расчетный период (1951–1973 гг.), но даже и за более длительный (1860–1974 гг.), но о водном балансе этого

года упоминалось выше. В 1974 г. приход воды в озеро был выше, чем в 1973 г., примерно на 23%. Особенno значительное количество воды поступило в мае и уровень озера поднялся на 3,5 м. Несколько больше, чем обычно, поступило воды в ноябре, что привело к положительному приращению уровня. Поэтому в целом за год уровень озера был выше предшествующего года на 24 см, однако ниже среднего многолетнего на 32 см.

Цикл колебания увлажненности (1951-1973 гг.) является внутривековым циклом и сам расположен в маловодной фазе векового цикла. Поэтому естественно, что объем водного баланса, рассчитанного за этот цикл, должен быть несколько ниже по сравнению с предыдущими циклами. Поскольку наблюдения над режимом р. Сухоны начались со времени постройки плотины в ее истоке, т.е. с 1880 г., оказалось возможным рассчитать сток из озера за весь этот период (разд. 3.1, наст. изд.). Многолетние данные по атмосферным осадкам, опубликованные в Климатических справочниках, позволили (гл. 2) подсчитать среднюю многолетнюю величину осадков за тот же период, что и речной сток. Испарение с поверхности озера за 93-летний период принято равным той же величине, что фигурирует в водном балансе за последний цикл (1951-1973 гг.), поскольку испарение в зоне избыточного увлажнения мало меняется из года в год. И, наконец, приток в озеро был рассчитан как остаточный член водного баланса (табл. 40).

Объем приходной части водного баланса за длительный промежуток времени (1880-1973 гг.) несколько больше, чем его величина за последний 23-летний период. Превышение составляет 204 10⁶ м³, или 4,5%. Рассмотренный 93-летний период включает два хорошо выраженных внутривековых цикла увлажненности. Если рассчитать водный баланс за первый цикл (1898-1951 гг.), то величина приходной части баланса составит 4,630 км³, что больше на 0,419 км³ таковой для второго цикла (1951-1973 гг.), т.е. на 5%.

В заключение сопоставим водный баланс оз. Кубенского с некоторыми другими достаточно крупными озерами Северо-Запада (Браславский и Викулина, 1954; Малинина, 1966; Нехайчик, 1964; Пронин, 1972).

Все представленные на рис. 26 озера расположены в зоне избыточного увлажнения. Количество атмосферных осадков, поступающих на водную поверхность озер, составляет 600-700 мм и мало меняется по территории. Несколько увеличивается испарение: от 300 мм на севере до 450 мм на юге района. Но ни осадки, ни испарение не играют существенной роли в водном балансе озер. Главное, что определяет водный баланс озер, - это приток поверхностных вод. На первый взгляд, кажется непонятным, почему в условиях большой климатической однородности бассейнов озер, где слой атмосферных осадков составляет 600-700 мм, объем приходной части водного баланса, выраженный в слое воды на поверхность озера, колеблется от 2 до 13 м. Основное, что определяет величи-

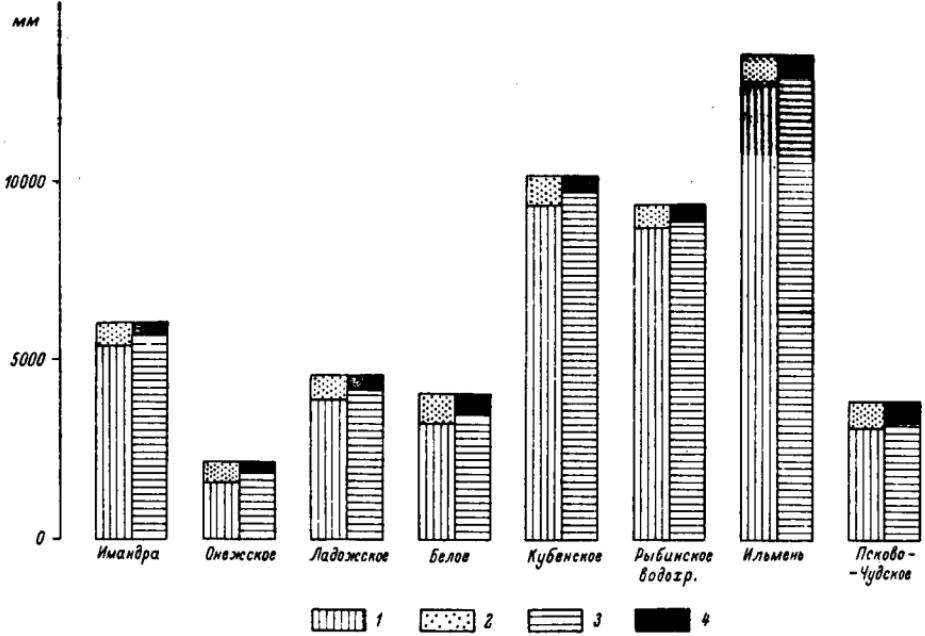


Рис. 26. Водный баланс различных водоемов Северо-Запада европейской части СССР.

1 – приток; 2 – осадки; 3 – сток; 4 – испарение.

ну слоя поступающих вод – это соотношение площади водосбора и площади озера. Чем больше это соотношение, тем больше приход воды в озеро за счет речного притока и тем меньшую роль в водном балансе играют испарение и осадки. В этом отношении оз. Кубенское как по величине, так и по соотношению элементов водного баланса близко к озеру Ильмень и Рыбинскому водохранилищу. Удельный водосбор (отношение площади бассейна к площади озера) этих трех водоемов имеет более или менее близкие значения (37–47). Количество воды, поступающее в озеро за год, выраженное в слое, достигает 11–13 м. У другой группы озер этого же района приход воды в озеро за год, выраженное в слое, в несколько раз меньше, чем в оз. Кубенском. У таких озер, как Белое и Онежское, объем приходной части водного баланса составляет всего 2–3 м (в слое воды), а их удельные водосборы едва достигают величины 2–5.

Значительно меняется для рассматриваемых озер величина объема их водной массы, участвующей в круговороте. Зависит эта величина от соотношения прихода воды в озеро и объема его водной массы (коэффициент условного водообмена). Для больших и глубоких озер, таких как Ладожское и Онежское, это соотношение сос-

Т а б л и ц а 40

Водный баланс оз. Кубенского
за многолетний период (1880-1973 гг.)

Приход	Объем, x10 ⁶ м ³	Слой, мм	%	Расход	Объем, x10 ⁶ м ³	Слой, мм	%
Речной приток	4278	10695	93.2	Сток из озера	4415	11043	96.3
Осадки	307	768	6.8	Испарение	170	420	3.7
Сумма	4585	11463	100	Сумма	4585	11463	100

тавляет около 0.1. Менее 10% водной массы озера участвует в ежегодном круговороте. Другие озера, имеющие малую емкость, к которым относится и оз. Кубенское, получают ежегодно количество воды, в несколько раз превышающее объем их водной массы. Так, в оз. Кубенское поступает воды в четыре раза больше его объема, т.е. в течение года вода озера может четыре раза заменяться речной водой.

Оз. Кубенское сильно проточное, приток и сток его составляют 90% от приходной и расходной частей его баланса и, по классификации Б.Б.Богословского (1971), относится к аккумулятивно-транзитной группе.

3.4. Уровенный режим

Краткая характеристика уровенного режима оз. Кубенского и его особенностей дана в „Ресурсах поверхностных вод СССР“ (1972) и ряде других работ (Сумароков, 1947; Филенко, 1966). И во всех них отмечаются высокие весенние и низкие зимние уровни, а также большая годовая амплитуда уровней оз. Кубенского. В справочнике „Основные гидрологические характеристики“ (1966) приведены средние месячные многолетние уровни по водомерным постам Пески и Коробово за период с 1931 по 1962 г. В настоящей работе уровенный режим оз. Кубенского рассмотрен за период с 1951 по 1973 г., для которого был рассчитан водный баланс, и за годы работы на озере экспедиции Института озероведения АН СССР (1972-1974 гг.). В работе использованы сведения об уровнях воды, опубликованные в Гидрологических ежегодниках, а также материалы из фондов Северного Управления ГМС и Ленинградского отделения института Гидропроект.

Наблюдения за уровнем воды на оз. Кубенском в разное время проводились на пяти водомерных постах, равномерно расположенных

женных по периметру озера. В настоящее время на озере действуют два водомерных поста — в деревнях Пески и Коробово. Один из них, в/п Пески, расположенный на северо-западном берегу озера, был открыт в 1913 г., а в 1918 г. начались наблюдения на юго-западном побережье, в д. Коробово. К сожалению, материалы уровенных наблюдений до 1931 г. не могли быть использованы, так как они оказались неувязанными с последующими наблюдениями (Ресурсы..., 1972). Ход уровня на этих постах согласуется, но почти всегда отметка уровня в Песках выше, чем в Коробово. По-видимому, существует постоянный уклон от Порозовицы, впадающей в озеро на северо-западе, в сторону Сухоны, вытекающей из озера на юго-востоке. Наличие наклона дна от Порозовицы к Сухоне отмечал еще Е.С. Соллертинский (1922). Кроме того, северо-западная часть озера более подвержена действию нагонов.

Режим уровней любого водоема формируется под влиянием питающего его бассейна, с одной стороны, и трансформации речной воды в озерной котловине, с другой. Реки, впадающие в оз. Кубенское, преимущественно снегового питания, с высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. Как видно из графика (рис. 27), построенного по многолетним средним месячным значениям, уровень озера имеет четко выраженный сезонный ход. Минимальные уровни наблюдаются в период зимней межени, чаще всего в марте. За расчетный 23-летний период (1951–1973 гг.) минимальные уровни в 16 случаях наблюдались в марте, в 5 случаях — в феврале и по одному случаю — в январе и декабре. В среднем с середины апреля начинается весенний подъем уровня за счет поступления талых вод с водосбора. Время начала подъема уровня, его величина и интенсивность зависят от многих факторов: высоты предпаводочного уровня, запасов снега, характера метеоусловий в зимнее и весеннее время. Максимальные уровни, как правило, наблюдаются в мае

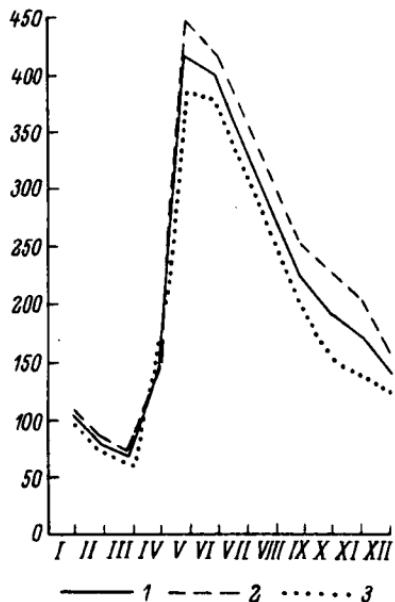


Рис. 27. Средние месячные уровни озера за полный цикл увлажненности и в разные фазы водности.

1 — полный цикл увлажненности (1951–1973 гг.); 2 — многоводная фаза (1951–1962 гг.); 3 — маловодная фаза (1963–1973 гг.).

и за расчетный период таких случаев было 14, в 8 случаях они приходились на июнь и в одном – на июль. Спад уровня регулируется плотиной. Летняя межень на озере выше зимней, что характерно для зарегулированных озер. В отдельные годы наблюдаются осенние дождевые паводки, но величина их незначительна – в среднем 50–60 см. Естественный уровневый режим оз. Кубенского нарушен плотиной „Знаменитой”, которая была построена в 1834 г., в 7,5 км от истока Сухоны для поддержания судоходных глубин на реке в летнюю межень. Плотина, собираемая ежегодно на спаде уровней весеннего половодья, создает на озере подпорный горизонт, который срабатывается в течение летней межени. По окончании навигации плотина разбирается. Таким образом, в течение большей части года озеро зарегулировано и только зимой и частично весной сохраняется естественный режим его уровней.

Кубенское озеро имеет свои особенности в годовом ходе уровня, проявляющиеся в большей, чем на других озерах, интенсивности весеннего подъема уровня и в большей годовой амплитуде его. Интенсивность весеннего подъема, достигающая 15–30 см в сутки в маловодные и 30–50 см в сутки в многоводные годы, связана с особенностью весеннего режима р. Сухоны. На р. Сухоне, вытекающей из озера, почти ежегодно в период весеннего половодья в среднем на 8–12 дней сток из озера прекращается и возникает обратное течение в сторону озера. Незначительные уклоны Сухоны в верховье и более раннее половодье на ее притоках – Вологде и Леже – приводят к тому, что уровень на самой Сухоне повышается, в то время как уровень в озере остается без изменений. Создается значительный уклон в сторону озера, и часть сухонских вод начинает течь в обратном направлении. В дальнейшем при повышении уровня воды в озере и понижении уровня воды на притоках Сухоны в результате прекращения половодья обратное течение сменяется нормальным.

Обладая обширным водосборным бассейном, оз. Кубенское относится к типу озер с большой годовой амплитудой уровня, равной 360 см. Установленная В.С.Сумароковым (1947) для ряда озер Севера СССР зависимость годовой амплитуды уровня от соотношения площади водосбора к площади озера свойственна и оз. Кубенскому, но у последнего, как отмечает В.С.Сумароков, она менее тесная из-за нарушения его уровенного режима устройством плотины. Наши исследования подтверждают сделанный В.С.Сумароковым вывод о том, что амплитуда годового уровня озера увеличивается за счет регулирующего действия плотины, которая задерживает весенний сток из озера.

Для характеристики средних многолетних уровней использован тот же период 1951–1973 гг., что и для составления водного баланса. Выбранный в качестве расчетного, он отражает определенный гидрологический цикл и помогает выявить особенности внутригодового распределения уровня в различные фазы водности. Смена фаз различной водности хорошо прослеживается на графике

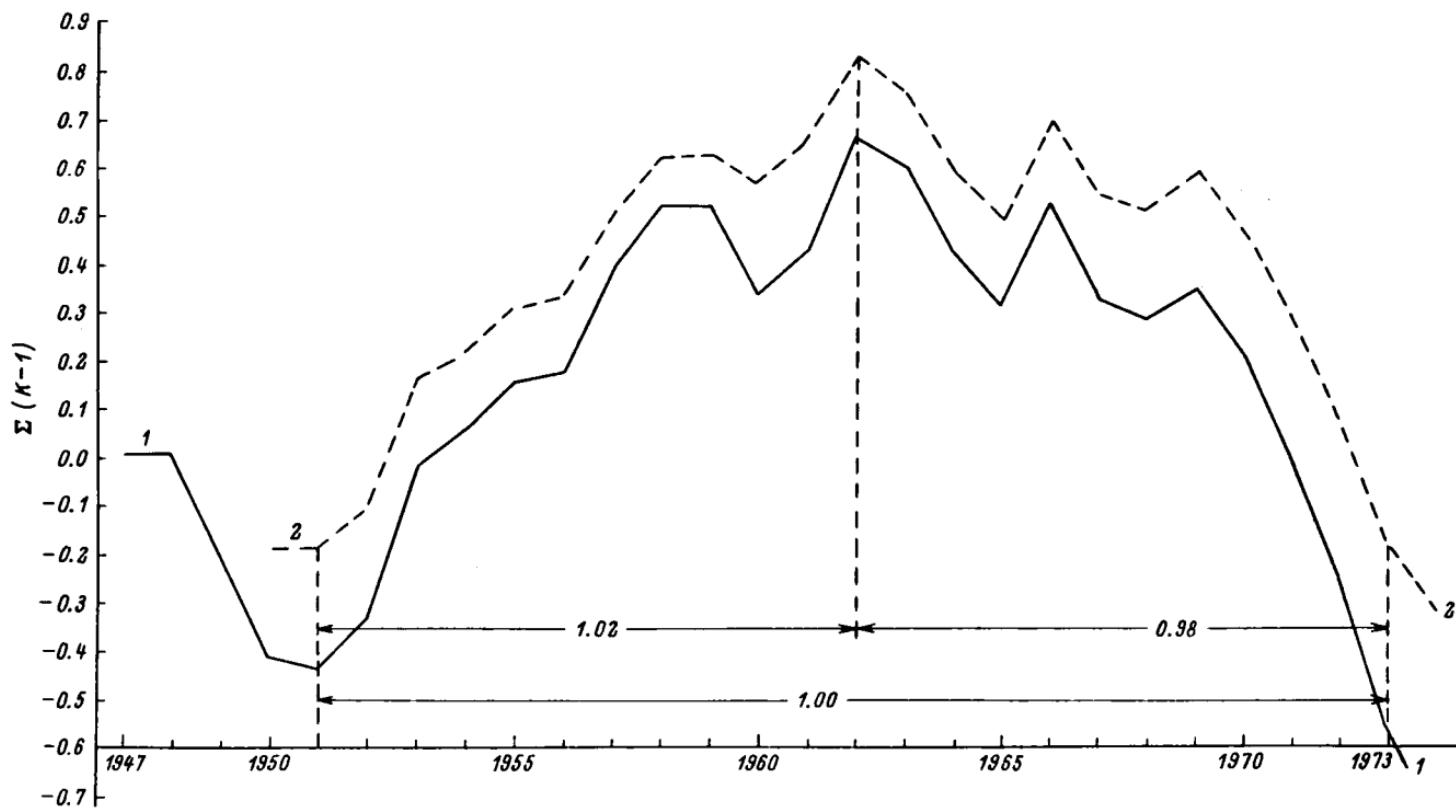


Рис. 28. Интегральные кривые модульных коэффициентов годового уровня по показаниям водомерных постов Пески (1) и Коробово (2).

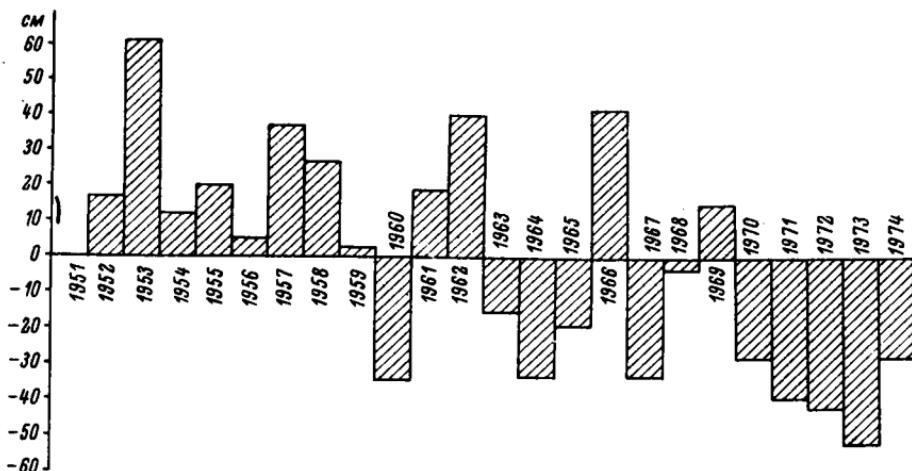


Рис. 29. График отклонений средних годовых уровней от среднего за расчетный период (1951–1973 гг.) по показаниям в/п Коробово.

колебания разностных интегральных кривых модульных коэффициентов, рассчитанных по средним годовым уровням воды (в/п Пески и Коробово) за период с 1947 по 1973 г. (рис. 28). На кривой по точкам перелома четко выделяется цикл 1951–1973 гг., включающий многоводную фазу (1951–1962 гг.), когда шло нарастание уровня, и маловодную (1963–1973 гг.), когда наблюдалось снижение его. Уровненные интегральные кривые модульных коэффициентов хорошо согласуются с таковыми по стоку рек, так как рассматриваемые нами колебания уровня в основном определяются колебаниями от года к году стока рек в бассейне оз. Кубенского (разд. 3.1, наст. изд.). В многоводную фазу 10 лет из 12 имели средние годовые уровни выше средней многолетней величины (рис. 29). Наибольшее положительное отклонение от среднего многолетнего значения уровня за этот период – в 1953 г. – составило 61 см, наименьшее – в 1959 г. – 3 см. Величина среднего годового уровня в 1951 г. была равна средней многолетней, и только 1960 г., необычайно маловодный для многоводной фазы, характеризуется отрицательным отклонением, равным 34 см. Обеспеченность годового уровня в многоводную фазу распределялась следующим образом: 5 лет из 12 имели обеспеченность в пределах 4–24%, 6 лет – в пределах от 28 до 52% и только 1960 г. был с обеспеченностью 84%.

График средних месячных отклонений в многоводную фазу указывает на положительные отклонения от средних месячных многолетних значений в течение года, кроме апреля (рис. 30, а).

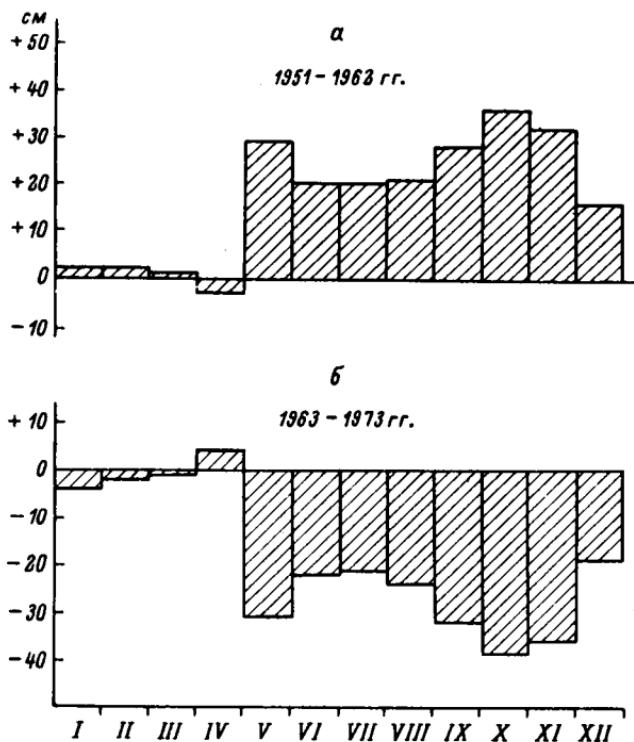


Рис. 30. График отклонений средних месячных уровней от средних многолетних за многоводную (а) и маловодную (б) фазы водности по показаниям в/п Коробово.

Уменьшение водности рек в бассейне оз. Кубенского в маловодную фазу отразилось на его уровненном режиме: 9 лет из 11 имели годовые уровни ниже среднего многолетнего значения (рис. 29). Месячные отклонения уровня в маловодную фазу, за исключением апреля, также были ниже средних месячных многолетних величин (рис. 30, б). В годы, составляющие маловодную фазу, обеспеченность годового уровня распределялась таким образом: 5 лет имели обеспеченность от 76 до 96%, 5 лет – от 50 до 75% и один 1966 г. был с 8%-ной обеспеченностью. Многоводный 1966 г. с очень интенсивным половодьем оказался в маловодной фазе, это отразилось на величине апрельского уровня. Если исключить 1966 г., то средний уровень в апреле в маловодную фазу также будет ниже средней многолетней отметки для апреля.

Для режимных характеристик нами использовались значения уровня по в/п Коробово (табл. 41), а для воднобалансовых расчетов – средние величины из показаний двух водомерных постов оз. Кубенского – Пески и Коробово. Средний многолет-

Т а б л и ц а 41

Средние месячные уровни оз. Кубенского за различные периоды в отметках над нулем графика

Период	I	II	III	IV	V	V1	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
В/п Коробово, „О“ графика 107.21 м													
1951-1973 гг. (полный цикл увлажненности)	102	79	68	157	417	400	342	280	224	191	172	138	214
1951-1962 гг. (многоводная фаза)	105	81	69	154	446	420	362	301	252	227	204	154	231
1963-1973 гг. (маловодная фаза)	98	77	67	161	386	378	321	256	192	152	136	119	195
В/п Пески, „О“ графика 107.62 м													
1951-1973 гг. (многолетний)	67	45	35	122	380	364	308	246	190	157	136	102	180
1951-1962 гг. (многоводная фаза)	70	47	36	119	407	381	326	268	217	192	167	120	197
1963-1973 гг.. (маловодная фаза)	64	43	35	126	350	345	287	223	161	119	103	84	162

Таблица 42

Средние месячные уровни оз. Кубенского за различные периоды (в/п Пески + в/п Коробово)

Период	I	II	III	IV	V	V1	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1951-1973 гг. (полный цикл ув- лажнен- ности)	108.26	108.04	107.93	108.81	111.40	111.24	110.66	110.04	109.48	109.16	108.96	108.62	109.40
1951-1962 гг. (много- водная фаза)	108.29	108.05	107.94	108.78	111.68	111.42	110.86	110.26	109.76	109.51	109.27	108.78	109.60
1963-1973 гг. (маловод- ная фа- за)	108.22	108.02	107.93	108.85	111.10	111.03	110.46	109.81	109.18	108.77	108.61	108.43	109.20
Годы рабо- ты экспе- диции:													
1972 г.	107.98	107.90	107.86	108.44	110.88	111.02	110.42	109.68	109.00	108.38	108.02	107.98	108.96
1973 г.	107.90	107.86	107.86	109.30	110.82	110.44	109.82	109.24	108.74	108.38	108.10	107.90	108.86
1974 г.	107.75	107.72	107.74	108.00	110.66	111.38	110.60	110.00	109.35	108.78	108.51	108.52	109.08
1966 г. (много- водный)	103.16	108.01	107.99	109.84	113.08	112.38	110.99	110.13	109.52	109.60	109.31	108.68	109.80
1953 г. (много- водный)	109.07	108.52	108.10	109.72	111.78	111.15	110.92	110.54	110.28	110.50	109.90	109.16	110.00

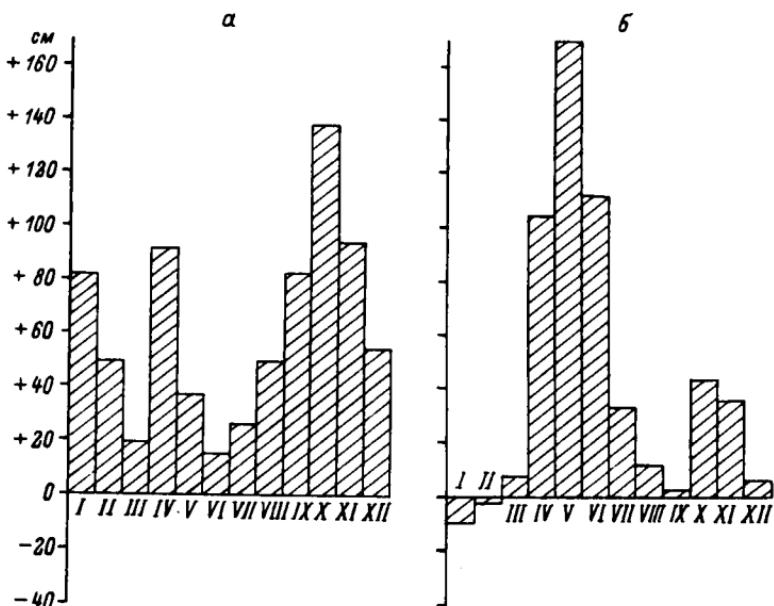


Рис. 31. График отклонений месячных уровней от средних многолетних за многоводные годы.

а - 1953 г., б - 1966 г.

ний годовой уровень озера, осредненный по двум водомерным постам и за расчетный период, равный 109.4 м abs. высоты, увеличивается в многоводную фазу на 20 см и уменьшается в маловодную на ту же величину (табл. 42). Амплитуда колебаний между наивысшим и наименее высоким средним месячным уровнем за расчетный период по в/п Коробово составила 549 см. Максимальная годовая амплитуда средних месячных уровней в многоводном 1966 г. была равна 511 см, минимальная в 1963 г. - 283 см и средняя за 23-летний период - 349 см (в/п Коробово). Высшие за год средние месячные уровни озера (в/п Коробово) за расчетный период изменились в пределах 348-586 см (110.89-113.07 м abs. высоты), низшие - в пределах 37-87 см (107.58-108.11 м abs. высоты).

Экстремально многоводными за расчетный период были 1953 и 1966 гг. (с обеспеченностью годового уровня соответственно 4 и 8%). Каждый из этих лет имеет свои особенности в годовом ходе уровня. Повышение количества осадков в летне-осенний сезон 1952 г. привело к повышению уровня в октябре-ноябре того же года. Осенний паводок 1952 г. явился причиной того, что озеро замерзло при высоком положении уровня. Отметка уровня в декабре 1952 г. была на 117 см выше средней

многолетней для декабря. Несмотря на понижение уровня в зимние месяцы 1953 г., предпаводочный уровень в марте был достаточно высок: на 9 см выше среднего для марта. Высокие зимние уровни и достаточно интенсивное половодье привели к тому, что годовой уровень 1953 г. был самым высоким за 23-летний период: его величина на 60 см выше средней многолетней. В течение всего 1953 г. месячные уровни были выше средних месячных многолетних значений (от 15 см в июне до 137 см в октябре; рис. 31, а).

Формирование режима уровней многоводного 1966 г. характеризуется своими особенностями. Низкие зимние уровни сменились очень интенсивным подъемом уровня в апреле-мае (рис. 31, б), чему способствовало повышенное количество осадков в январе-мае 1966 г. Майский уровень 1966 г. выше предпаводочного (мартовского) на 511 см и выше среднего многолетнего для мая на 169 см, а средняя годовая величина уровня в 1966 г. на 40 см выше среднего многолетнего. Многоводными за рассматриваемый период были также 1962 и 1957 гг. с обеспеченностью годового уровня соответственно 12 и 16%.

Годы работы на оз. Кубенском экспедиции Института озероведения АН СССР (1972-1974 гг.) приходятся на конец маловодной фазы. Все три года являются маловодными: средняя годовая величина уровня каждого из этих лет ниже средней многолетней. Самым маловодным из них был 1973 г., он же является экстремально маловодным за расчетный 23-летний период. Годовой уровень 1972 г. (108.96 мабс. высоты) оказался ниже среднего многолетнего на 44 см. В течение всего года средние месячные уровни были ниже средних многолетних (рис. 32, а): минимальное отклонение в марте составило 6 см, максимальное в ноябре - 96 см. Нарастание отрицательных отклонений в течение 1972 г. вполне закономерно и обусловлено особенностями метеорологической обстановки. По данным А.Ф. Изотовой (гл. 2, наст. изд.), 1972 г. характеризуется холодной малоснежной зимой, нормальной весной и очень теплым летом. Повышенная температура воздуха и резкое сокращение осадков в летние месяцы 1972 г. привели к сокращению притока воды в озеро на 33% против среднего многолетнего (разд. 3.1, наст. изд.). График ежедневного хода уровня за 1972 г. показывает, что после предпаводкового минимума, имевшего место в марте, в начале второй декады апреля начался подъем уровня, продолжавшийся 50 дней. Общая высота подъема составила 350 см, средняя интенсивность - 7 см/сутки, но в отдельные дни уровень поднимался и на 20 см. Максимальный уровень в 1972 г. наблюдался в июне, после чего начался спад, регулируемый плотиной.

Средний годовой уровень 1973 г. (108.86 мабс. высоты) с обеспеченностью 96% можно характеризовать как очень низкий. Сокращение притока воды в озеро на 46% по сравнению

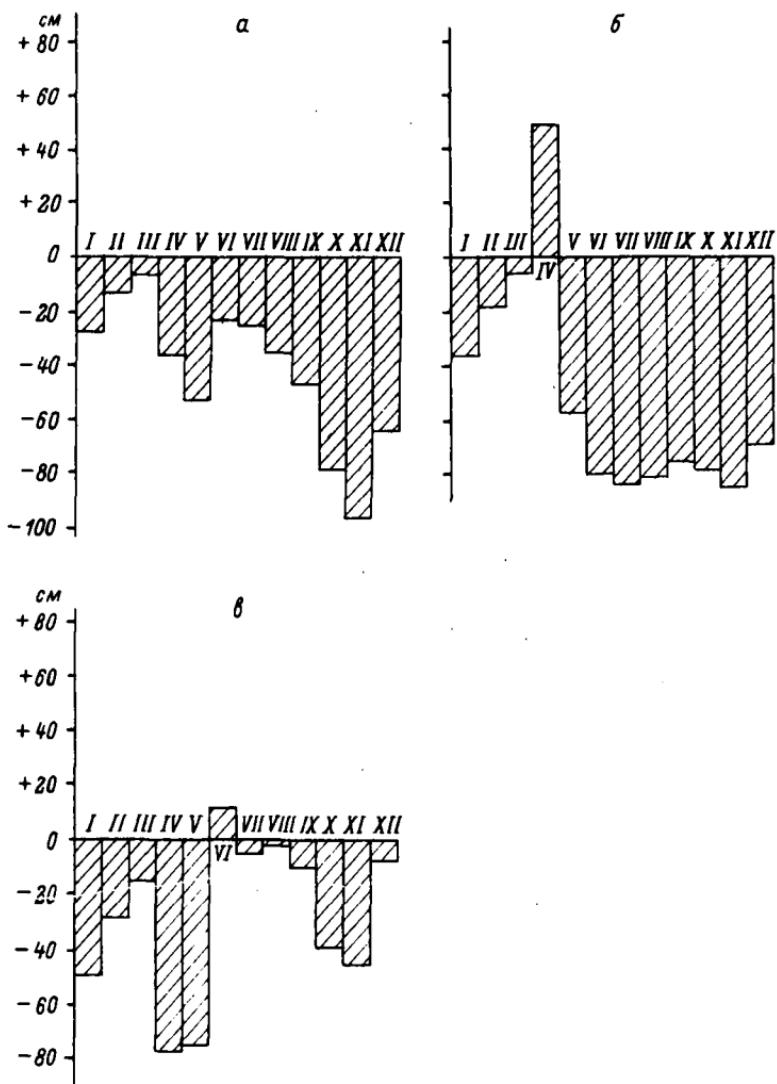


Рис. 32. График отклонений месячных уровней от средних многолетних за годы работы экспедиции.

а – 1972 г.; б – 1973 г.; в – 1974 г.

с многолетним сказалось на его уровенном режиме. Средний годовой уровень 1973 г. снизился на 54 см по отношению к среднему многолетнему. Месячные уровни в 1973 г. (кроме апреля) были также значительно ниже средних месячных многолетних. Отрицательное отклонение от 6 см в марте возрастает к ноябрю до 85 см (рис. 32, б). Исключение составляет апрель, уровень которого был на 49 см выше среднего многолетнего для апреля. Особенностью водного режима 1973 г. является раннее интенсивное половодье на реках района и, как следствие, — необычайно высокий для маловодного года апрельский уровень воды в озере. Как отмечает В.А.Кириллова (разд. 3.1, наст. изд.), начало половодья на р. Кубене в 1973 г. приходится на 1 апреля, пик — на 15 апреля, окончание — на конец мая. Приток воды в озеро в апреле был в 1.5 раза выше среднего многолетнего значения. Причиной столь раннего интенсивного половодья явилось повышенное количество осадков в феврале-апреле 1973 г., а также высокая в сравнении с нормой температура воздуха весной. Весну 1973 г. в многолетнем разрезе (гл. 2, наст. изд.) можно считать теплой. Все эти особенности отразились в годовом ходе уровня воды в озере в 1973 г. В связи с тем, что предшествующий 1972 г. был маловодным, озеро замерзло при низком положении уровня, который продолжал снижаться в зимние месяцы, достигнув в марте минимальных значений. Отметка уровня в марте 1973 г. была на 6 см ниже средней многолетней для марта. Наполнение озера началось еще подо льдом в первой декаде апреля, интенсивное повышение уровня приходится на вторую и третью декады апреля. За апрель уровень поднялся на 280 см, а в отдельные дни его он повышался на 36-40 см в сутки. Подъем уровня, но уже менее интенсивный, продолжался до середины мая. Общая продолжительность весеннего подъема уровня в 1973 г. равна 40 дням, высота подъема составила 310 см при средней интенсивности подъема 7.5 см/сутки. Высокие отметки уровня на озере держались недолго, и уже во второй половине мая, на месяц раньше, чем в 1972 г., начался спад уровня. Максимальный уровень в 1973 г. наблюдался в мае, но в сравнении со средним многолетним значением для мая он был на 57 см ниже.

Средний годовой уровень 1974 г. (109.08 м абс. высоты) оказался на 32 см ниже среднего многолетнего. Обеспеченность его в 1974 г. составляет 72%. По уровню 1974 г. является также маловодным, хотя в среднем он более многоводный, чем предшествующие 1972 и 1973 гг. Средние месячные значения уровня в 1974 г. (кроме июня) были ниже средних многолетних (рис. 32, в). Низкими были зимние уровни 1974 г.; отметка уровня в январе была на 49 см, в феврале — на 28 см и в марте — на 15 см ниже средних месячных многолетних значений соответствующего месяца. В отличие от 1973 г. апрель-

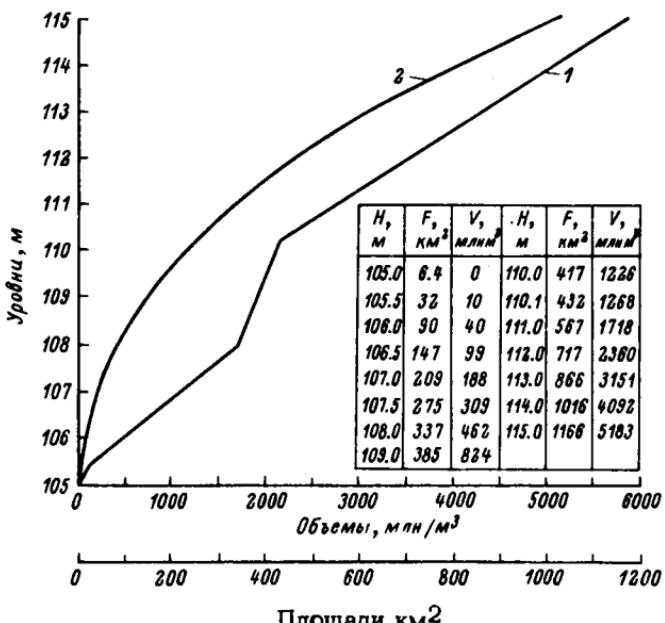


Рис. 33. Кривые зависимости площади зеркала (1) и объема воды (2) озера от высоты уровня.

ский уровень 1974 г. был очень низким: на 86 см ниже многолетнего значения для апреля.

Особенностью 1974 г. является позднее высокое и сравнительно непродолжительное половодье на реках, питающих оз. Кубенское, и, как средство этого, – запоздавшее в сравнении с предыдущим годом и со средней датой начало весеннего подъема уровня воды на озере, которое в 1974 г. приходилось на начало мая. Как уже отмечалось, уровень в апреле 1974 г. был очень низким, поэтому несмотря на то, что за май уровень поднялся на 360 см над предпаводочными отметками, среднее месячное значение его в мае было на 75 см меньше среднего многолетнего для мая, июньский же уровень был на 12 см выше среднего многолетнего для июня.

При хозяйственном использовании озер необходимо точное знание изменений объема их водной массы, а также площадей озера, особенно в условиях естественного и искусственного затопления. Основой для такой оценки послужили рассчитанные нами уровни, средние из показаний водомерных постов Пески и Коробово, а также батиграфическая кривая зависимости площади озера и его объема от высотных отметок уровня, построенная Ленинградским отделением института Гидропроект (рис. 33). При среднем многолетнем годовом уровне оз. Кубенского, равного 109.4 м абсолютной высоты, площадь его составляет 400 км^2 ,

Т а б л и ц а 43

Изменение F , V и $H_{ср}$ оз. Ку бенского
в зависимости от колебания уровня в марте
(числитель) и мае (знаменатель) (в/п Коробово)

Средняя ме- сячная отмет- ка уровня, м абс. выс.	Амплитуда колебания уровня, м	F , км ²	V , млн м ³	$H_{ср.}$
1951–1973 гг. (полный цикл увлажненности)				
$\frac{107.89}{111.38}$	3.49	$\frac{323}{624}$	$\frac{428}{1961}$	$\frac{1.3}{3.1}$
1966 г. (многоводный)				
$\frac{107.96}{113.07}$	5.11	$\frac{332}{876}$	$\frac{453}{3217}$	$\frac{1.4}{3.8}$
1973 г. (маловодный)				
$\frac{107.83}{110.81}$	2.98	$\frac{315}{538}$	$\frac{410}{1623}$	$\frac{1.3}{3.0}$

а объем – 1.02 км³. Площадь озера в многоводную фазу увеличилась на 4 км², а в маловодную – уменьшилась на 9 км² в сравнении со средней многолетней величиной. Средние годовые объемы воды в озере в различные по водности фазы меняются незначительно, увеличиваясь в многоводную фазу до 1.06 км³ и уменьшаясь в маловодную до 0.904 км³. Для многоводного 1953 г. площадь озера составила 417 км², а объем его – 1.226 км³; в многоводном 1966 г. – соответственно 410 км² и 1.145 км³; в экстремально маловодном 1973 г. – 378 км² и 0.773 км³. Колебания средних годовых величин площади и объема не столь значительны, как в течение года, о чем свидетельствуют данные табл. 43.

ДИНАМИКА ВОДНЫХ МАСС ОЗ.КУБЕНСКОГО

4.1. Р е ж и м в о л н е н и я

Изучение волнения на оз. Кубенском имеет научное и практическое значение. Сведения о характере волнения в специфических условиях мелководного озера представляют интерес не только для познания самого явления, но и необходимы при исследовании различных лимнологических процессов.

В 1972 г. была проведена серия волнографных измерений вблизи о. Каменного (рис. 2), по результатам которой составлена краткая характеристика волнения на озере (Воронцов, 1974). В настоящей работе материалы этих измерений послужили основой для более подробной характеристики волнения, проверки расчетного метода и расчета режима волнения на озере.

Наблюдения над волнением проводились с помощью двух волнографов и максимально-минимальной волномерной вехи, установленных на глубинах 2 (волнограф № 1) и 1 м (волнограф № 2) соответственно в 80 и 2 м от берега. Максимально-минимальная веха устанавливалась совместно с волнографом № 1. Измерения волнения производились с 26 августа по 7 сентября, и за этот период отмечено три случая с большими скоростями ветра, обусловленные прохождением серии циклонов над северо-западной частью европейской части СССР. Повышения скорости ветра юго-западного направления с 26 по 29 августа были вызваны прохождением теплого и холодного фронтов циклона с центром, расположенным к северо-западу от оз. Лача. С 30 августа по 3 сентября озеро находилось под воздействием тыловой части этого циклона, выразившимся в усилении ветров С и С3 направлений до 12 м/сек. и резком падении температуры воздуха. С 8 час. 4 сентября при прохождении холодного фронта наблюдалось увеличение скорости ветра С3 направления до 10 м/сек. При прохождении вторичных фронтов в тыловой части циклона 5 сентября скорость ветра увеличивалась до 10-11 м/сек. 6 сентября ветровая обстановка определялась прохождением теплого фронта. Результаты наблюдений над волнением и ветром представлены в табл. 44.

Статистический анализ данных волнографных измерений (54 волнограммы) показал, что распределение высот волн (в системе волнения) на озере (на глубинах 1 и 2 м) в среднем подчиняется закону распределения высот волн в мелководных условиях (Виленский, Глуховский, 1955). Так, отношение высот

Т а б л и ц а 44

Данные наблюдений над волнением и ветром на

Дата, срок наблюдения	Ветер, м/сек.	
	о. Каменный	ст. Коробово
5 IX 07 ¹²	C3 - 9.2	C3 - 7.8
07 ¹⁵	C3 - 9.2	C3 - 7.7
07 ¹⁷	C3 - 9.1	-
07 ²⁰	-	-
07 ²³	-	-
07 ²⁵	-	-
07 ²⁸	C3 - 9.0	C3 - 7.6
09 ¹⁷	CC3 - 10.2	C3 - 7.1
09 ⁴²	CC3 - 9.3	C3 - 7.0
10 ⁰⁰	CC3 - 9.0	-
10 ³⁶	CC3 - 9.6	CC3 - 7.0
10 ^{48x}	CC3 - 9.5	-
11 ⁰⁰	CC3 - 9.4	-
13 ¹²	C3 - 7.2	C3 - 7.5
13 ³²	C3 - 6.8	C3 - 7.7
14 ⁰⁰	CC3 - 6.5	C3 - 8.0

оз. Кубенском в 1972 г.

Длина разгона, км	Элементы волн				
	λ_H , см	$\bar{\lambda}_{CP}$, см	$T_{H,\delta}$, сек.	T , сек.	K_h
26.0-37.0	44	19.0	2.18	1.78	2.32
"	49	17.3	2.92	1.67	2.83
"	54	20.0	2.06	1.90	2.70
"	59	22.0	2.06	2.01	2.70
"	64	18.6	2.14	1.84	3.69
"	53	19.0	2.32	1.73	2.79
"	72	19.0	2.32	1.76	3.79
21.0-37.0	83	20.0	2.53	1.88	4.18
"	72	18.6	2.50	2.20	3.84
"	80	19.6	2.63	2.13	4.10
21.0	48	19.3	2.52	2.07	2.50
"	27	9.1	2.25	2.30	2.94
"	43	17.6	2.62	2.27	2.41
26.0	39	16.3	2.50	1.97	2.41
"	33	13.1	2.50	2.16	2.49
"	34	11.4	2.80	2.19	3.01

Т а б л и ц а 44 (продолжение)

Дата, срок наблюдения	Ветер, м/сек.		Длина разгона, км	Элементы волн				
	о. Каменный	ст. Коробово		h_H , см	\bar{h}_{cp} , см	$T_{H.B.}$, сек.	\bar{T} , сек.	K_h
5 IX 14 ³⁰	CC3 - 5.0	C3 - 8.3	26.0	33	13.1	2.27	2.29	2.49
15 ⁰⁷	CC3 - 8.8	C3 - 8.8	26.0-37.0	73	18.0	2.80	2.36	4.03
16 ¹⁷	C3 - 10.2	C3 - 9.0	"	92	22.8	2.80	2.54	4.05
16 ⁵⁷	C3 - 8.0	"	"	67	16.3	3.10	2.73	4.10
18 ⁰⁷	C3 - 8.4	"	"	52	16.3	2.78	2.50	3.18
18 ³²	C3 - 8.5	"	"	69		2.50		
19 ⁰⁰	C3 - 8.5	C3 - 8.6	-	37	16.3	3.12	2.44	2.24
6 IX 08 ²⁴	Ю3 - 3.6	Ю3 - 5.8	6.4-8.0	26	11.4	1.87	1.58	2.29
08 ⁴⁴	Ю3 - 5.0	ЮЮ3 - 3.7	"	26	10.1	1.87	1.56	2.61
10 ⁴⁵	ЮЮ3 - 9.2	Ю3 - 5.2	"	52	19.3	2.06	1.89	2.70
11 ¹⁰	ЮЮ3 - 10.5	Ю3 - 5.9	"	57		1.87		
11 ³⁰	ЮЮ3 - 10.5	Ю3 - 6.0	"	60	20.2	2.25	2.17	2.99
11 ⁴⁰	ЮЮ3 - 9.0	Ю3 - 6.2	"	60	21.5	2.44	2.07	2.81
11 ⁵⁰	ЮЮ3 - 8.1	Ю3 - 6.3	"	58	18.9	2.62	2.09	3.04
5-6 IX (ММВ)			26.0-37.0	98			3.0	

П р и м е ч а н и е. h_H - наибольшая высота волн; \bar{h}_{cp} - средняя высота волн; $T_{H.B.}$ - период наибольшей волны; \bar{T} - средний период волн; $K_h = \frac{h_H}{\bar{h}_{cp}}$; ММВ - максимально-минимальная веха. Звездочкой отмечено наблюдение, сделанное по береговому волнографу (№ 2).

наибольших волн (λ_H) к средним высотам (\bar{h}) - $K_h = \frac{\lambda_H}{\bar{h}}$ - в среднем для всех измерений составляет 2.94, а, согласно Виленскому и Глуховскому, при $\frac{\lambda}{H} = 0.06$ $K_h = 3.00$. Однако в ряде случаев (табл. 44) получены очень высокие для мелководья значения $\frac{\lambda}{H}$ (до 4.1). Периоды наибольших по высоте волн ($T_{H.B.}$) по измерениям в точке с глубиной 2 м (волнограф № 1) были больше периодов волн средней высоты (\bar{T}) ($\frac{T_{H.B.}}{\bar{T}} = 1.16$), а в точке с глубиной 1 м (волнограф № 2) - меньше ($\frac{T_{H.B.}}{\bar{T}} = 0.87$). Для всех случаев наблюдений эти отношения изменялись в пределах от 1.16 до 1 и от 1 до 0.70. Таким образом, анализ наблюдений над волнением указывает на значительную изменчивость распределения элементов волн на оз. Кубенском.

Озеро представляет собой обширное мелководное пространство с площадью 400 км² и средней глубиной 2.5 м. Основным фактором, влияющим на структуру поля волн в таких условиях, является глубина. Уже при скорости ветра 5 м/сек. критерий мелководности - $\frac{V}{\sqrt{gH}}$ (где V - скорость ветра, H - глубина) - у оз. Кубенского составляет 1.0. Однако вследствие того, что профили дна озера, как древнего водоема, выработаны в результате длительного воздействия волн, трансформация их на таких профилях может приобретать иной характер по сравнению с тем, какой она имеет, например, в условиях моря или водохранилища. Как отмечает А.В.Живаго (1954), подводные береговые склоны оз. Кубенского - водоема с меняющимся уровнем - отличаются по своей форме от морских и озерных. В целом для озера эта форма характеризуется наличием вогнутости в верхней части склона и прямолинейностью в нижней.

Влияние глубины на развитие волнения проявляется в ограничении роста высот и периодов волн. Так, при скоростях ветра до 10-11 м/сек. и длине разгона волн до 37 км максимальная высота волн не превышала 1.0 м, а средний период - 3.2 сек. (табл. 44). В глубоководных водоемах, например на Ладожском озере, при той же скорости ветра и длине разгона наибольшая высота волн (Воронцов, 1966) может достигать 2.0 м, а средний период - 3.6 сек. Представляется интересным определить потери энергии волнами на мелководье и сравнить их с таковыми в условиях глубокой воды.

Спектры волн, рассчитанные по волнограммам, полученным при скорости ветра до 10-11 м/сек., длине разгона 37 км и глубине 2 м на оз. Кубенском, показывают, что наибольшей энергией обладают составляющие спектра, расположенные в диапазоне частот от 1.9 до 2.8 рад./сек. На частотах, меньших 1.9 рад./сек., энергия спектров резко уменьшается. В условиях глубокой воды на Ладожском озере при той же скo-

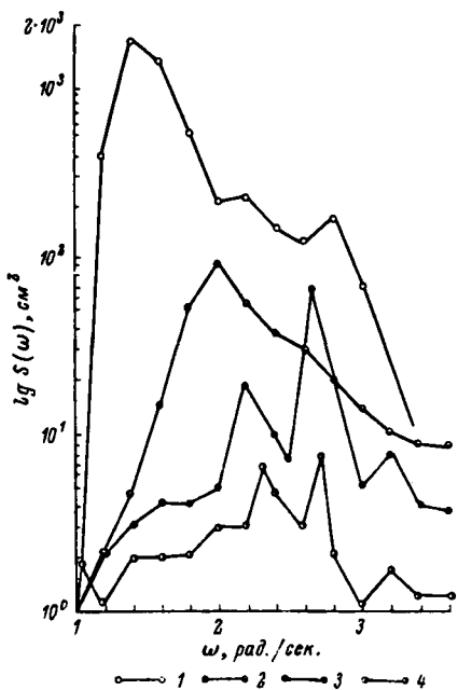


Рис. 34. Спектры ветрового волнения на озерах Ладожском и Кубенском.

1 – Ладожское (глубина 100 м, скорость ветра 10 м/сек., длина разгона 37 км); 2 – Кубенское (глубина 2 м, скорость ветра 10 м/сек., длина разгона 37 км); 3–4 – Кубенское (глубина соответственно 2 и 1 м, скорость ветра 5 м/сек.).

рости ветра и длине разгона максимум спектральной энергии расположен на участке частот 1.3–1.7 рад./сек. (рис. 34). Сравнение спектров волн озер Ладожского и Кубенского показывает (рис. 34), что на последнем составляющие спектра волн, расположенные на частотах, меньших 1.9 рад./сек., либо не развиваются, либо, развиваясь, теряют энергию при взаимодействии с дном. В результате этих потерь энергия спектра волн в мелководных условиях оз. Кубенского при скорости ветра до 10–11 м/сек. на порядок меньше энергии спектра волн в условиях глубокой воды Ладожского. В береговой зоне оз. Кубенского при глубине до 1 м (по данным волнографов № 1 и № 2) энергия спектра волн уменьшается в 2 раза (рис. 34).

Теория поля волн на мелководных водоемах разработана в трудах А.П.Браславского (1952), Н.А.Лабзовского (1952), Е.М.Селюк (1967), В.В.Шулейкина (1968), Н.Е.Кондратьева (1953) и ряда других исследователей. Практические приемы

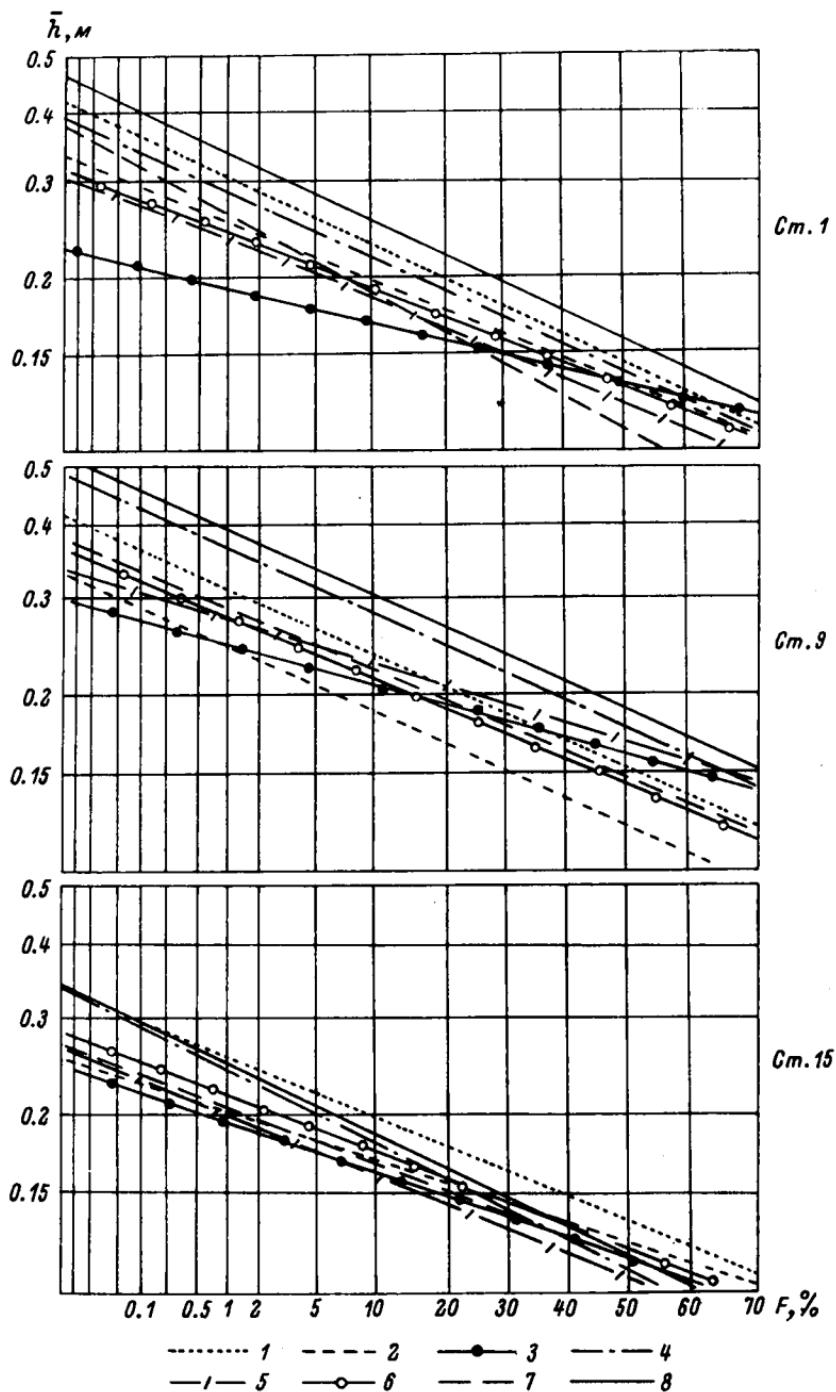
расчета параметров волн на акваториях произвольной глубины, учитывающие теоретические достижения и новые экспериментальные данные, изложены в Руководстве по расчету параметров волн (1969).

В настоящее время в водоемах различают четыре зоны, в пределах которых распространение волн и характер волнения имеют свои особенности. В первой, прибрежной, зоне (у подветренного берега) волнение развивается так же, как и на глубокой воде, и размеры волн определяются здесь только разгоном. Вторая зона начинается там, где волнение оказывается под влиянием дна. Эта зона делится на участки — промежуточный и предельного развития волн. На промежуточном участке высота волн зависит как от разгона, так и от глубины водоема, а на участке предельного развития — только от глубины. В третьей и четвертой зонах происходит разрушение волн и накат.

Данные волнографных наблюдений, приведенные в табл. 44, в соответствии с этим делением, характеризуют в основном зону предельного развития волн на оз. Кубенском. Ширина зоны предельного развития волн, включая третью и четвертую зоны, на оз. Кубенском при среднем уровне воды и скорости ветра 5 м/сек. составляет по расчетам 32 км, при скорости ветра 10 м/сек. — 42 км, а при ветрах скорость до 20 м/сек. распространяется на 50 км, т.е. почти на всю длину озера. Волнение в таких условиях является важным динамическим фактором, регулирующим лимнологические процессы не только в узкой прибрежной полосе и в поверхностных слоях, но и в пределах всей водной массы озера.

Данные наблюдений над ветром, высотой и периодом волн показывают, что изменения элементов волн тесно связаны с ходом скорости и направления ветра как в пункте наблюдения (на оз. Каменном), так и на метеостанции в д. Коробово (табл. 44). Для обоснования расчета параметров волн по данным о скорости ветра произведено сравнение высот и периодов волн, рассчитанных по методу, предлагаемому в Руководстве (1969), с измеренными. При расчете учитывались такие волногенерирующие факторы, как скорость ветра, длина разгона и глубина воды по разгону. Сравнение показало, что расчеты дают несколько завышенные значения высот волн. С учетом снижения высоты волн из-за фильтрации части их энергии по направлению к расчетной точке (в 80 м от о. Каменного) среднее отклонение расчетных средних высот волн от измеренных составляет +16 (-11%), а средних периодов — +6 (-13%). Отклонение расчетных высот волн 1%-ной обеспеченности от измеренных составляет в среднем +28 (-8%).

Для расчета режимных характеристик волнения на озере использовались данные о повторяемости градаций скорости ветра по направлениям за периоды открытой воды, полученные на метеостанции в д. Коробово. Расчеты производились по осред-



ненным данным о ветре за период с 1961 по 1971 г. Наибольшую повторяемость в период открытой воды в районе оз. Кубенского имеют ветры ЮЗ и З направлений (19 и 18%), однако скорости их редко достигают 11–15 м/сек. (0.09% из числа всех случаев наблюдений). Повторяемость же ветров СЗ и С направлений скоростью 11–15 м/сек. составляет 0.30–0.34%. Наибольшей скоростью (16–20 м/сек.) отличаются ветры СЗ и ЮВ направлений, но повторяемость этих скоростей ветра ЮВ направлений (0.09%) в два раза меньше, чем СЗ (0.18%). Наименьшей повторяемостью (7.7%) и скоростью (до 8–10 м/сек.) по сравнению с другими направлениями ветра характеризуются ветры восточного направления.

Режим волнения в целом по озеру находится в соответствии с распределением скоростей и направлений ветра. Однако разные районы озера отличаются по режиму волнения вследствие изменения по акватории таких условий волнообразования, как глубины и длины разгона. Так, в юго-восточной и центральной частях озера (вблизи ст. 9 и 15, рис. 2) вероятность появления средних высот волн более 0.2 м составляет 30–40%, в то время как в северо-западной части озера (к северу от ст. 1, рис. 2) – всего 8%. Вероятность превышения средних высот волн градации 0.3–0.4 м в юго-восточной части озера составляет 0.1%, в центральном районе – 0.5%, а в северо-западной части средняя высота не превышает этого предела.

Повторяемость (ρ %) и вероятность превышения (F , %) градаций высоты волн по направлениям от числа наблюдений при каждом направлении распространения волнения даны в табл. 45 и на рис. 35, которые свидетельствуют, что средняя высота волн на озере (при среднем уровне) не превышает 0.5 м и только в центральном районе озера (ст. 9) при северо-западном направлении ветра средняя высота волн с вероятностью 0.01% может превысить 0.5 м.

Разность между наибольшими и наименьшими уровнями воды в период открытой воды составляет в среднем 2.4 м (Малинина, Татаринова, 1974) и может достигать в отдельные годы (1966 г.) 3.8 м. Такие значительные изменения глубины воды оказывают существенное влияние на режим волнения. Если при среднем уровне, глубине 2.5 м и ветре скоростью 10 м/сек. высота волн 1%-ной обеспеченности (в системе волнения) составляет 0.8 м, то при наивысшем уровне и глубине 6.9 м высота волн 1%-ной обеспеченности может увеличиться

Рис. 35. Вероятность превышения (F , %) градаций высот волн (\bar{h} , м) по направлениям ветра в разных районах озера.

1 – С; 2 – СВ; 3 – В; 4 – ЮВ; 5 – Ю; 6 – ЮЗ; 7 – З; 8 – СЗ.

Т а б л и ц а 45

Режимная повторяемость (в %) градаций средней высоты волн
разных направлений в оз. Кубенском

Средняя высота волн, м	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Северо-западная часть озера (ст. 1)								
0.10-0.19	20	20	16	18	29	20	15	24
0.20-0.29	0.5	0.1	0.01	0.5	0.05	0.1	0.05	1.0
0.30-0.39	0.01			0.01				0.01
Центральный район озера (ст. 9)								
0.10-0.19	49	29	65	62	61	39	53	68
0.20-0.29	7	0.9	1	15	5	2	5	23
0.30-0.39	0.3	0.01		1	0.01	0.02	0.01	3
0.40-0.49	0.01			0.02				0.15
Больше 0.50								0.01
Юго-восточная часть озера (ст. 15)								
0.10-0.19	42	39	28	47	34	31	27	56
0.20-0.29	6	1	0.01	7	1	0.5	1.2	10
0.30-0.39	0.2	0.005		0.2	0.005	0.05	0.03	0.3
0.40-0.49	0.005			0.005				0.006

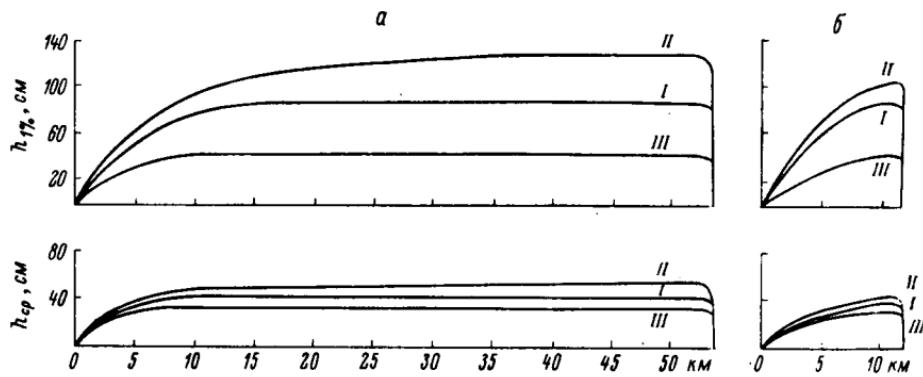


Рис. 36. Рассчитанные высоты волн на продольном (а) и поперечном (б) профилях озера для скорости ветра 10 м/сек. при среднем (I), наивысшем (II) и наимизшем (III) уровнях воды.

до 1.4 м. При наимизшем уровне и глубине 1.5 м высота волн 1%-ной обеспеченности при скорости ветра 10 м/сек. составляет 0.4 м (рис. 36).

Поскольку при высоком положении уровня воды в мае-июне по направлению преобладают ветры СЗ четверти (Справочник по климату СССР, 1967), наибольшая волновая активность отмечается в юго-восточной части озера, вдоль южного участка берега. В осенние месяцы (сентябрь-ноябрь) при низком уровне воды, когда преобладающими являются ветры ЮЗ четверти, наибольшему волновому воздействию подвергается северо-восточный берег центральной части озера. Сравнительно редко под воздействием волнения оказываются берега в северо-западной части озера. Такое распределение волновой активности по акватории озера оказывает различное воздействие на движение наносов и переработку берегов в разных районах озера. Исследования механического состава наносов на береговых склонах оз. Кубенского, проводившиеся А.П.Живаго (1954), показали, что в юго-восточной части озера наиболее сортированные наносы располагаются в верхней части берегового склона. Высокие бары и лагуны распространены также на юго-восточном берегу. На северо-западном берегу широкое распространение получили флювиогляциальные отложения, слагающие невысокие гряды, и материал наносов здесь значительно более грубый (0.3-0.03 Мф), чем на юго-восточном берегу (0.1-0.03 Мф).

Результирующее для всех направлений волнения распределение высот волн по акватории озера рассчитано по 46 точкам. Данные представлены в виде изолиний равных средних высот волн 50%- и 3%-ной режимной повторяемости (рис. 37, а, б). Изолинии равных высот волн в основном следуют распо-

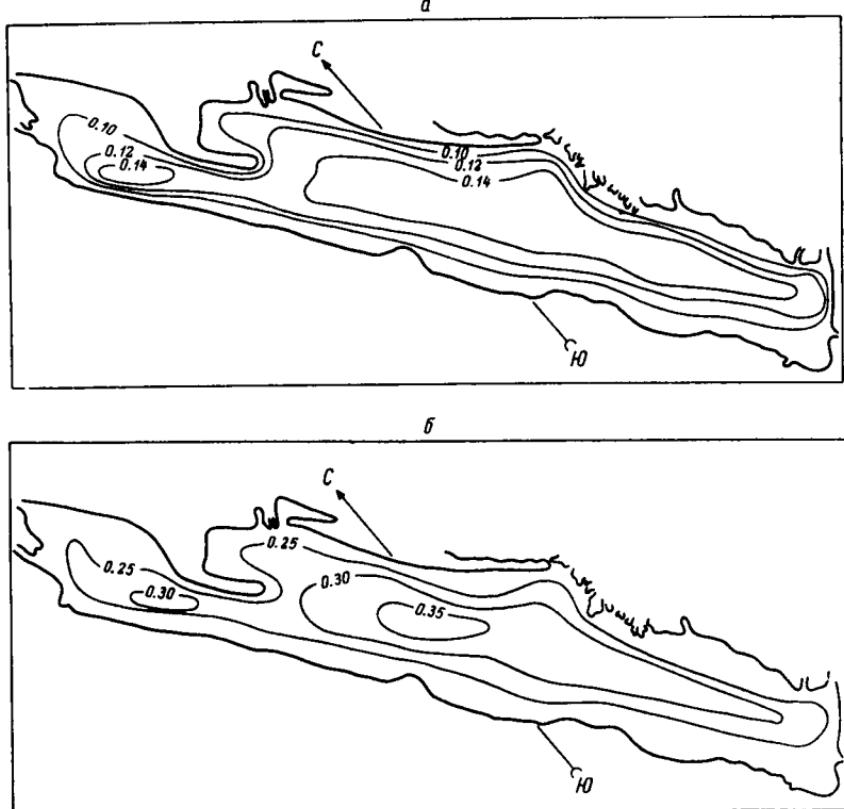


Рис. 37. Распределение по озеру рассчитанной средней высоты волн (в м) 50%-ной (а) и 3%-ной (б) режимной повторяемости.

ложению изобат. Районам озера с большими глубинами соответствуют большие высоты волн. С увеличением высоты волн изолинии волнения оконтуривают все более глубоководные районы озера. В среднем по акватории средняя по 46 точкам высота волн 1%-ной обеспеченности 50%-ной режимной повторяемости составляет 0.22 м, а средняя длина волн 1%-ной обеспеченности – 6.4 м. Средняя глубина озера (2.6) оказалась близкой по значению к величине 0.65 λ_0 , равной 2.9 м (λ_0 – средняя длина волн 50%-ной режимной обеспеченности, рассчитанная по средней скорости и средней длине разгона ветра). На наш взгляд, такое совпадение не случайно, а свидетельствует о том, что распределение глубин по акватории озера в многолетнем масштабе находится в динамическом равновесии с воздействием волн на дно. Для проверки этого предположения произведен расчет величин возможного волнового воздействия на дно по акватории озера.

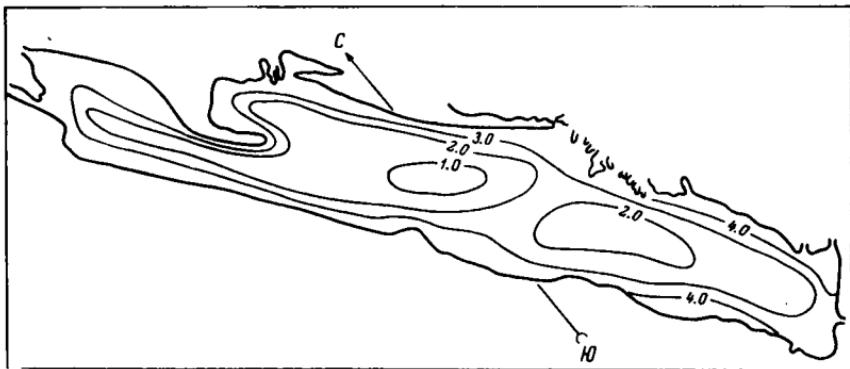
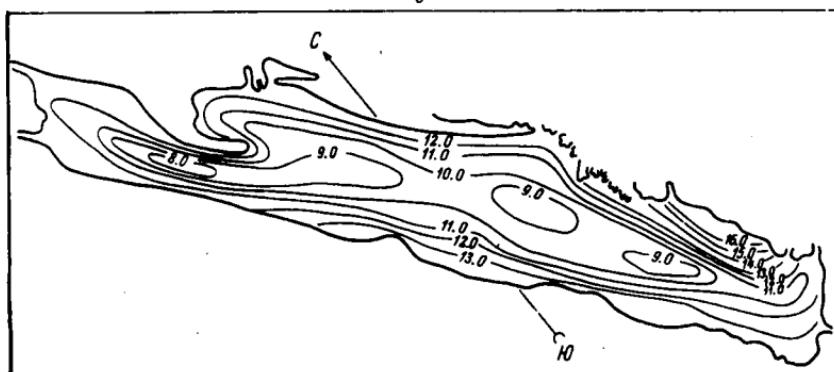
a*b*

Рис. 38. Распределение по озеру средней горизонтальной составляющей орбитальной скорости волнового движения у дна (в см/сек.) 50%-ной (а) и 3%-ной (б) режимной повторяемости.

Показателем воздействия волн на дно может служить орбитальная скорость волнового движения у дна - ее горизонтальная составляющая. Расчет горизонтальной составляющей орбитальной скорости (V) выполнен по известной в гидравлике формуле (Божич и Джунковский, 1949; Шулейкин, 1968; Кожевников, 1972):

$$V_{\max} = \pm \sqrt{\frac{h}{\frac{2\lambda}{\pi g} \operatorname{sh} \frac{4\pi}{\lambda} H}},$$

где h – высота волн, λ – длина волн, H – глубина воды в расчетной точке. Формула предусматривает расчет максимальной скорости движения воды на дне при прохождении волны через расчетную точку. Расчеты средней максимальной горизонтальной составляющей скорости движения воды на дне (V_{\max}) по данным о средней высоте и длине волн 50%-ной режимной повторяемости в 46 точках показали, что при глубине воды от 0.5 до 3.2 м значения V_{\max} не превышают 4.3 см/сек. При таких скоростях движения воды частицы грунтов, слагающих дно оз. Кубенского, не могут подвергаться размыву. Размыв песчаных и илистых грунтов, которые слагают дно оз. Кубенского (Курочкина, 1974), согласно данным Н.Е. Кондратьева (1953), начинается при скоростях движения воды, превышающих 0.18 м/сек. Такой величины V_{\max} (среднее) достигает при увеличении средней высоты волн до 0.4 м, вероятность превышения которой составляет в среднем по озеру менее 0.5%. Необходимо отметить, что если средние V_{\max} достигают величины 0.18 м/сек. только при высоте волн выше 0.4 м, то V_{\max} 1%-ной обеспеченности, превышающие 0.18 м/сек., появляются уже при средней высоте волн 0.2 м.

Таким образом, размыв песчаных грунтов (крупностью 0.5 МД) на оз. Кубенском начинается, согласно расчетам, при достижении средних высот волн 0.2 м, вероятность превышения которых изменяется по озеру от 0.2 до 40% (рис. 35). Процессы размыва и движения наносов наиболее вероятны в юго-восточном и центральном районах озера. Распределение горизонтальной составляющей донных скоростей волнового движения по акватории озера 3%- и 50%-ной режимной повторяемости показано на рис. 38.

Распределение донных скоростей волнового движения воды несомненно должно регулировать расселение фауны и флоры по дну и береговым склонам оз. Кубенского.

4.2. Течения и внутренний водообмен

Исследование внутреннего водообмена озер, осуществляемого течениями, является важным разделом комплексных лимнологических исследований. Течения водоемов играют большую роль в формировании, перемещении и трансформации водных масс; они являются одним из важных экологических факторов, прямо или косвенно формирующих среду обитания растительного и животного мира; течения формируют ложе водоема и перераспределяют донные отложения. Помимо большого научного значения, исследование течений внутренних водоемов имеет и

практический интерес. Так, знание режима течений необходимо при проектировании сбросных сооружений и водозаборов коммунального и технического водоснабжения.

Несмотря на большую роль течений в жизни водоема, их изучение в озерах до сих пор остается весьма сложной проблемой современной лимнологии из-за недостаточности количества эффективных технических средств, необходимых для постановки исследований по этим вопросам. В связи с этим и степень изученности течений на отдельных водоемах совершенно недостаточна. Последнее полностью относится и к оз. Кубенскому, где исследований течений и внутреннего водообмена до настоящего времени не проводилось. В литературе отсутствуют какие-либо сведения о передвижении водных масс этого водоема.

Методика исследований течений

В настоящее время применяются три основных метода исследования течений: 1) натурные наблюдения и их анализ; 2) математическое моделирование, предусматривающее расчеты характеристик течений; 3) физическое моделирование, выполняемое на гидравлических и аэродинамических моделях. При исследовании течений крупных и глубоких озер, таких как Ладожское и Онежское, нами использовались первые два метода в такой последовательности: расчет разного вида течений (плотностных и ветровых) одним из существующих теоретических методов, а затем сопоставление полученных в результате расчетов схем течений с натурными данными (Охлопкова, 1966, 1972).

В отличие от Ладожского и Онежского озер Кубенское, хоть и большой по площади водоем (400 км^2), но довольно мелководный (средняя глубина – 2.5 м). Ввиду мелководности оно целиком доступно ветровому перемешиванию, а поэтому не имеет устойчивого температурного расслоения по глубине и акватории (Тихомиров, Егоров, 1974). Последнее обстоятельство – указание на отсутствие в озере плотностных течений. Так как оз. Кубенское – не сильно проточный водоем (условный водообмен около 4.0), стоковые течения от впадающих рек проявляются лишь в приусտьевых участках озера, о чем свидетельствуют материалы экспедиции, приводимые ниже. Отсутствие плотностных течений и локальное влияние стоковых позволяет считать, что водообмен в озере осуществляется ветровыми течениями, которые, как показали наблюдения, имеют неустановившийся характер.

Ветровые течения во внутренних водоемах обычно рассчитываются методами А.В. Карапшева (1960) и А.И. Фельзенбаума (1960). К сожалению, ни один из этих методов, на наш взгляд, нецелесообразно использовать для расчета течений оз. Кубенского. Метод А.В. Карапшева, отличаясь большой сложностью в практи-

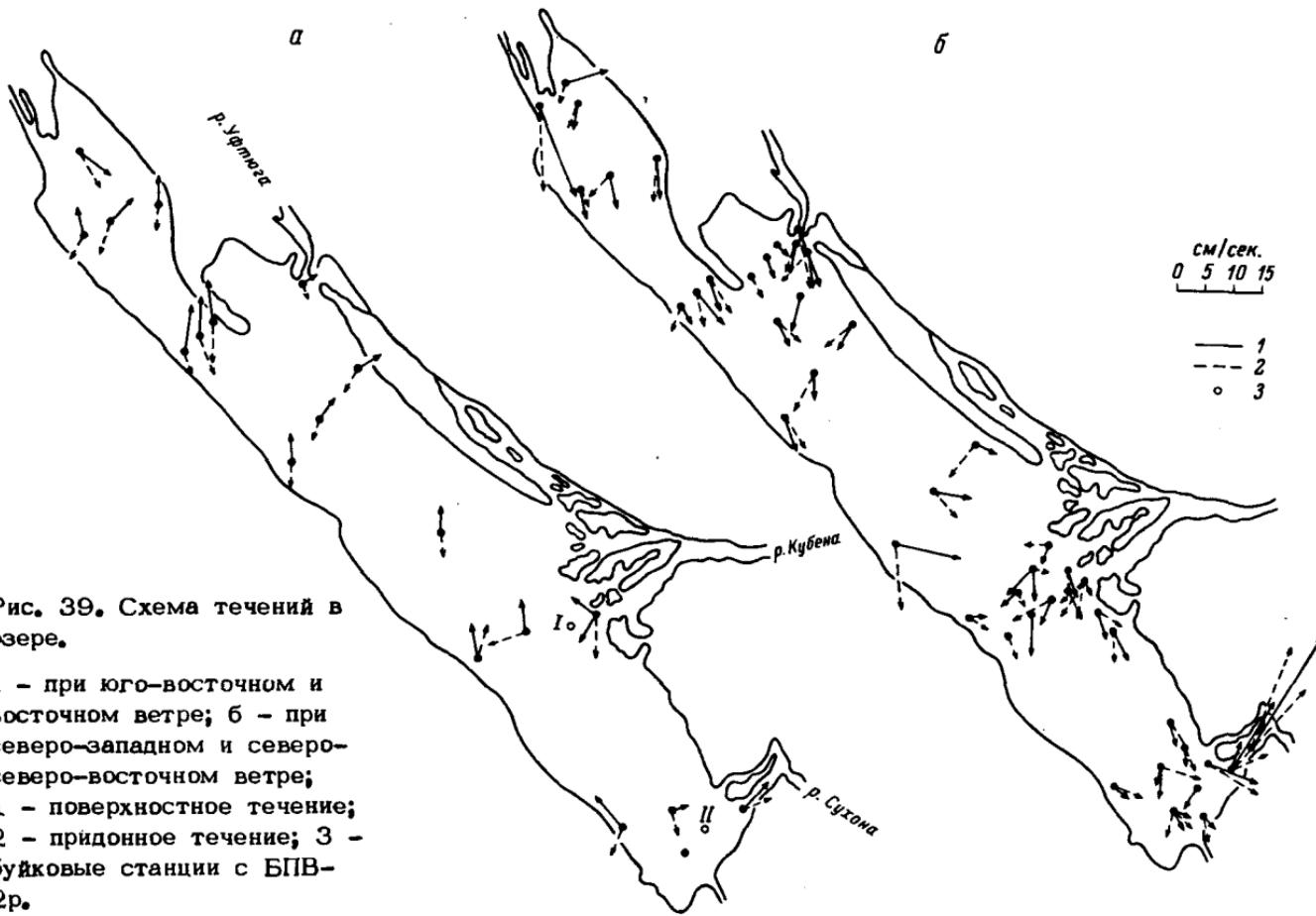


Рис. 39. Схема течений в озере.

а – при юго-восточном и восточном ветре; б – при северо-западном и северо-северо-восточном ветре;

1 – поверхностное течение;
2 – придонное течение; 3 –
буйковые станции с БПВ-
2р.

ческом применении, позволяет рассчитать характеристики течений относительно узловой вертикали водоема, но не дает представления о распределении этих характеристик по площади всего водоема, т.е. того, что являлось основной задачей наших исследований. Метод А.И. Фельзенбаума позволяет рассчитывать установившиеся ветровые течения посредством функции полных потоков. Используемый в океанологии, он наиболее применим к большим и глубоким водоемам, которые по своим размерам ближе всего к теоретической модели Экмана, на которой этот метод и основан. Кроме того, расчет этим методом предполагает установившийся режим ветра над водоемом, что прямо противоположно тем условиям, какие существуют в мелководном оз. Кубенском, где под влиянием меняющихся во времени силы и направления ветра быстро перестраивается система течений. Все это заставляет отказаться от него.

Существует еще и эмпирический метод расчета ветровых течений, разработанный И.М. Соскиным (1962) для морей. Однако применение его к условиям озер и водохранилищ требует уточнения характеристик ветровых течений в соответствующих условиях. Забегая несколько вперед, скажем, что ветровые коэффициенты, полученные по нашим натурным данным для оз. Кубенского, оказались меньше ветровых коэффициентов, рассчитанных И.М. Соскиным для морских условий. Это, по-видимому, объясняется тем, что в замкнутых водоемах из-за ограниченности их размеров на чисто дрейфовые течения накладываются градиентные и вторичные ветровые течения, характеристики которых находятся в более сложной зависимости от характеристик ветра, чем таковые в морских условиях. Поэтому, несмотря на простоту расчетов ветровых течений этим методом, от применения его к расчету течений оз. Кубенского следует отказаться.

Ввиду того что ни одним из существующих расчетных методов по вышеприведенным причинам нельзя воспользоваться при расчете ветровых течений оз. Кубенского, в работе проводится анализ натурных данных без каких-либо теоретических расчетов. Полевые работы по исследованию течений озера проводились экспедицией ежегодно с мая по конец сентября в течение трех лет (1972–1974 гг.). Основной метод полевых исследований – съемка течений с помощью морских вертушек на сети постоянных разрезов, расположенных по всей территории водоема (рис. 39). Помимо измерений характеристик течений, на станциях проводились измерения скорости и направления ветра на высоте 2–3 м над водной поверхностью, наблюдения над степенью волнения, прозрачностью, а периодически – и электропроводностью воды. Измерения элементов течений производились на двух горизонтах: на поверхности (глубина 0,5 м) и в придонном слое. Иногда обследовался и промежуточный слой – 1,5–2 м. Съемки течений озера повторялись регулярно 1–2 раза в месяц. Всего выполнено 15 съемок, которые отражают разные ветровые ситуации. Помимо периодических съемок в 1974 г., течения озера в двух его пунктах (рис. 39) регистри-

ровались самописцами БПВ-2р (АБС), работающими автономно. Полученные материалы позволяют судить о структуре течений, их временной изменчивости и определить качественную и количественную степень взаимосвязи с другими гидрометеорологическими процессами.

Следует отметить, что подобного рода исследований на мелководных озерах проведено крайне мало, и четкой методики постановок АБС на таких озерах пока не существует. В опубликованных работах (Литвинов, 1968; Филатова, 1972) приводятся различные ее варианты, но большинство из них оказались малоприемлемыми для оз. Кубенского в силу некоторых специфических его особенностей (значительные колебания уровня в течение сезона, небольшие глубины, интенсивное судоходство). Нами для постановок самописцев в различных частях озера использовались обстановочные бакены. Ввиду значительных колебаний уровня озера в течение сезона длительное действие самописцев в придонном слое оказалось невозможным. Для статистической обработки полученного материала была использована программа корреляционного и спектрального анализов, разработанная А.Н. Мичуриным и В.В. Казарьянном (1972). Все расчеты выполнены на ЦЭВМ БЭСМ-3М. Большую помощь в обработке наблюдений и обсуждении полученных результатов оказали сотрудники Института Н.Н. Филатов и М.А. Стучевский.

В связи с предполагаемой переброской вод северных озер в южные засушливые районы страны, в бассейн р. Волги, помимо получения общей характеристики течений водоема, необходимо было более детально обследовать зоны распространения в озере стоковых течений. Такие исследования при естественном режиме водоема позволяют составить прогноз внутреннего водообмена озера после изменения его режима. Распространение стока рек в озере изучалось путем съемок характеристик течений и электропроводности воды в прилегающих к устьям рек районах озера. Электропроводность воды использовалась как качественный показатель распространения речного стока в озере. Помимо инструментальных наблюдений, выполнен расчет зоны распространения вод р. Кубены, главного притока в озеро, по методу Н.А. Давтян (1974).

Полученные результаты исследований изложены в двух разделах работы: в первом даны характеристики ветровых течений озера, распределение их по площади водоема, а также изменчивость во времени; второй посвящен результатам исследования стоковых течений.

Ветровые течения озера

Как уже отмечалось выше, основными течениями, определяющими внутренний водообмен в озере, являются ветровые. Относительно резкие изменения их направления и скорости обусловлены мелко-

водностью водоема, которая, кроме того, усиливает роль местных ветров в формировании самих течений. По результатам анализа многочисленного натурного материала были построены осредненные схемы течений для господствующих направлений ветра (рис. 39). Как свидетельствуют эти схемы, при юго-восточных и восточных ветрах со средней скоростью 2-5 м/сек. поверхностное течение направлено по ходу их действия – в северный конец озера (рис. 39, а); исключение составляют районы устьев и истока рек. В придонном слое, как правило, возникает течение, обратное поверхностному, или компенсационное противотечение. Средние скорости течений, как поверхностного, так и придонного, не превышают 10 см/сек. и только в наиболее узком месте озера, на разрезе у мыса Шелин, увеличиваются до 15 см/сек.

При ветрах с северной составляющей (северо-западных-северо-северо-восточных) и средней скоростью 4-5 м/сек. в течение, направленное в южный конец озера, к р. Сухоне (рис. 39, б), вовлекается вся водная масса от поверхности до дна. Средние скорости не превышают 12 см/сек. При ветрах, направление которых совпадает с поперечной осью озера, т.е. западных и юго-западных, со средней скоростью 5-7 м/сек. поверхностное течение почти по всему озеру направлено на север, при этом в придонном горизонте возникает компенсационное противотечение. Скорости течений по всей водной толще составляют в среднем 12-15 см/сек.

При анализе схем течений озера (рис. 39, 40) обращает на себя внимание тот факт, что независимо от направления ветра в придонном горизонте постоянно действует течение, которое, имея небольшие скорости, устойчиво направлено из северного конца озера в южную его часть. Указание на существование такого течения есть еще у Е.С. Соллертинского (1922), который объясняет его возникновение наличием наклона дна в сторону юго-восточной части озера, что вызывает медленное течение вод из впадающей в оз. Кубенское р. Порозовицы в вытекающую из него р. Сухону.

Часто в озере наблюдаются вторичные ветровые (градиентные) течения. Так, во время съемки в сентябре 1972 г. имели место градиентные течения, направленные в южную часть озера, т.е. на встречу ветру (рис. 40). Такое направление течений вызвано преобладающим в продолжение нескольких дней до съемки действием юго-восточного ветра, создавшего нагон воды в северном конце озера, который в свою очередь явился причиной образования градиентных течений, направленных в сторону подветренного берега. Скорости таких течений в среднем не превышали 5-6 см/сек. и часто на поверхности были настолько малы, что не улавливались вертужкой. И только у истока р. Сухоны и в районе сужения у мыса Шелин оказались несколько выше – 9-10 см/сек.

При неустойчивом ветре течения быстро реагируют на изменение его направления, о чем свидетельствуют данные суточных станций, которые периодически выполнялись на стандартной вертикали (рис. 2, ст. 4) в 1972 г. Результаты наблюдений на одной из та-

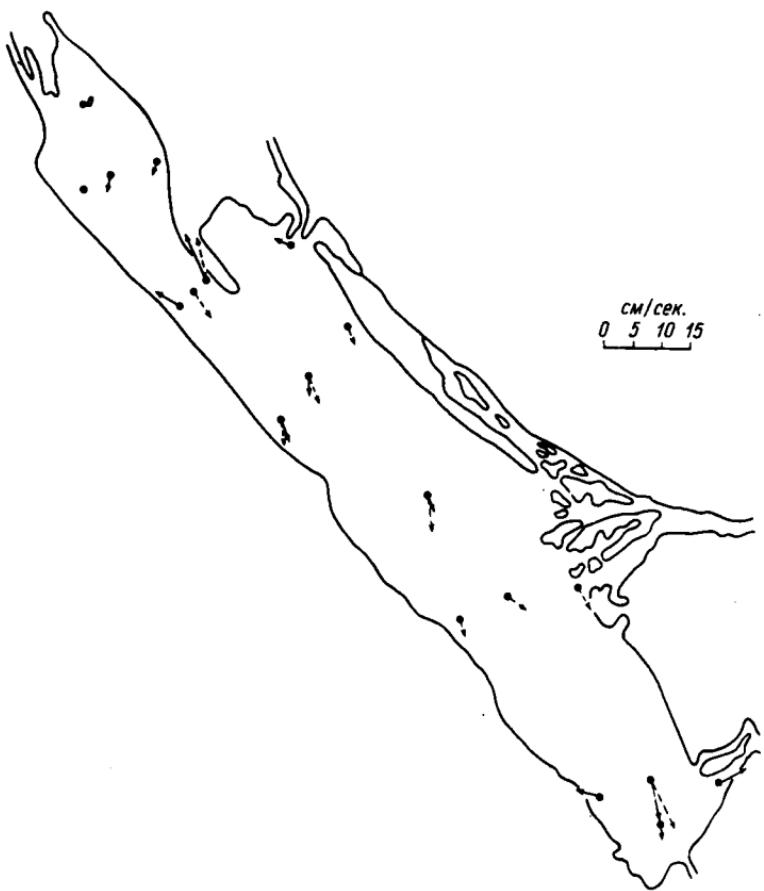


Рис. 40. Вторичные ветровые течения (ветер ЮВ, 3.5 м/сек.).
Условные обозначения те же, что и на рис. 39.

ких станций, приведенные в табл. 46, показывают, что при изменении в течение полусуток направления ветра от северо-восточного до юго-западного (по часовой стрелке) поверхностное течение меняло свое направление с западного до восточного (также по часовой стрелке).

Важной характеристикой ветровых течений является ветровой коэффициент, показывающий, какой процент от скорости ветра составляет скорость вызванного им течения. По натурным данным (за 3 года) построена зависимость скорости поверхностного течения (глубина 0.5 м) от скорости ветра разных направлений (рис. 41), из которой определены ветровые коэффициенты. Значения их колеблются в пределах от 1.4 до 2.9%. Широкий диапазон их изменения объясняется тем, что ветровой коэффициент зависит

Т а б л и ц а 46

Направление (в град.) ветра и течений по данным
суточной станции 20-21 VII 1972 г.

Время наблюдения, час. мин.	Ветер	Течение
16 ⁰⁰	45	270
20 ⁰⁰	135	347
22 ⁰⁰	180	34
01 ⁰⁰	202	80
08 ⁰⁰	225	93
09 ³⁰	225	62

от многих факторов, в частности от направления ветра по отношению к береговой черте и местоположения станции, на которой измерялось течение. Ветровые коэффициенты, определенные по данным записей БПВ-2р, несколько выше: их максимальные значения достигают 3.8%. Это объясняется тем, что в периоды сильного волнения самописцы дают завышенные значения скоростей течений, фиксируя, помимо горизонтального переноса водных масс, орбитальную скорость волнения.

В водоемах удлиненной формы с однородной массой воды при действии ветра вдоль его продольной оси и равномерно по ширине водоема, что, как правило, вызывает сгон и нагон, происходит разделение течения на два разнонаправленных потока. Дрейфовое течение, направленное в сторону ветра, приурочено к поверхности и охватывает в среднем примерно 1/3 глубины, ниже развивается градиентное компенсационное противотечение. Указанная глубина разделения получена теоретическим методом. На оз. Кубенском, как показали натурные данные, двухслойное движение вод возникает чаще всего при юго-восточном ветре. Глубина расслоения течений составляет 1.5-2 м, т.е. близка к теоретической.

Сведения о повторяемости направлений и скоростей течений, рассчитанные по данным записей самописцев течений, приведены в табл. 47. Как они показывают, наибольшую повторяемость, по данным ст. 1 (рис. 2), имеют течения двух направлений – северо-западного (38%) и юго-восточного (29%), т.е. по продольной оси озера. На ст. 2 преобладающие направления течений – от восточных до юго-юго-восточных (41%); течения северо-западного направления имеют самую низкую повторяемость (18%). Это свидетельствует о том, что ст. 2 находится под влиянием истока из

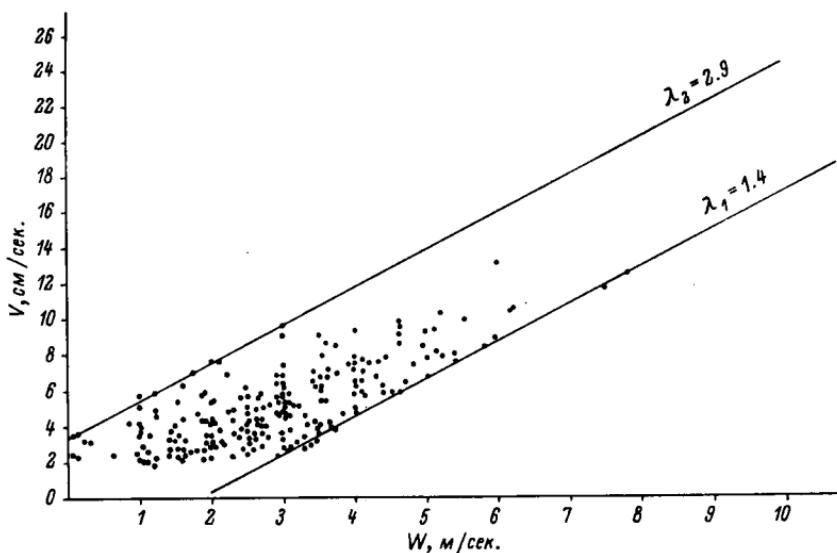


Рис. 41. Зависимость скорости поверхностного ветрового течения от скорости ветра (по натурным данным).

озера – р. Сухоны. Наибольшую повторяемость, как видно из таблицы, имеют скорости течений в диапазоне 3–15 см/сек. – примерно 80% от общего числа измерений.

Поскольку ветер, как основной фактор, определяющий течения, имеет сезонные изменения, тем же изменениям подвержены и течения. Анализ многолетних повторяемостей направления ветра по ст. Коробово (гл. 2, наст. изд.) свидетельствует о преобладании в течение года ветров юго-западных и западных румбов. В периоды открытой воды (май–октябрь) наряду с западными ветрами значительную роль играют северные и северо-западные ветры. В годы работы экспедиции на оз. Кубенском распределение повторяемости направления ветра несколько отличается от такового в многолетнем разрезе. Так, в весенне-летний период (май–июль) 1972–1974 гг. наряду с западными и северными ветрами большой процент составляли восточные ветры; ближе к осени и осенью (август–октябрь) увеличивается процент повторяемости южных ветров за счет снижения повторяемости северных ветров. В соответствии с таким распределением ветров в течение навигационного периода распределены по месяцам и системы течений. Согласно данным повторяемости ветра различной скорости (табл. 47), в течение года преобладают ветры со скоростью до 5 м/сек. (68–75%). Во все месяцы года наблюдаются ветры со скоростью более 11 м/сек., однако их доля в среднем не превышает 5% (гл. 2, наст. изд.). Максимальная скорость ветра по ст. Коробово за период открытой воды достигает 16–18 м/сек. И обычно отрезки времени с ветром

Т а б л и ц а 47

Повторяемость различных градаций скорости
и направления течений (горизонт 1.5 м)

Направление течений, град.	Повторяемость направ- ления, %		Скорость течения, см/сек.	Повторяемость скоро- сти, %	
	ABC-I	ABC-II		ABC-1	ABC-II
1-30	0.0	5.2	3-4	6.3	15.5
31-60	0.8	3.9	5-9	44.9	46.0
61-90	1.6	5.9	10-14	21.3	25.8
91-120	3.9	16.2	15-19	11.0	6.4
121-150	11.8	24.7	20-24	3.9	1.7
151-180	17.3	5.5	25-29	4.7	2.7
181-210	7.9	4.3	30-40	4.7	2.2
211-240	5.5	3.9	41-45	3.2	0.0
241-270	4.7	4.7			
271-300	10.2	7.8			
301-330	27.5	10.4			
331-360	8.7	7.7			

такой скорости непродолжительны – 6–9 час., но в мае ветры силой 15–17 м/сек. могут действовать в течение 1.5–2 суток. Средние месячные скорости ветра за навигационный период 1972–1974 гг. несколько ниже средних многолетних скоростей ветра: в отдельные месяцы – на 1–1.5 м/сек. При таких скоростях ветра преобладающие скорости ветровых течений в озере не превышают 10–12 см/сек.

Временная изменчивость течений

Временная изменчивость характеристик течений слагается из ряда регулярных и случайных колебаний. Периодичность или квазипериодичность являются типичными свойствами гидрологических процессов, связанных с периодическим воздействием внешних сил. Выявление периодической составляющей в натурной реализации процесса часто затруднено из-за наличия случайных пульсаций, вызванных главным образом процессами турбулентности. Методы выявления периодичностей основаны на статистическом анализе, и в частности на исследовании функций автокорреляции и спектральной плотности.

Временная изменчивость течений оз. Кубенского исследовалась на основании анализа данных записей БПВ (табл. 48).

Т а б л и ц а 48

Режим работы буквопечатающих вертушек
на оз. Кубенском в 1974 г.

Станция (рис.2)	Период дейст- вия станции	Глубина станции, м	Горизонт измере- ния, м	Дискрет- ность из- мерения, мин	Число из- мерений
1	20-26 VI	3.4	1.5	5	1657
1	20-26 VI	3.4	3.0	5	1718
1	18 VII-02 VIII	3.5	1.5	15	1422
2	30 VIII-15 IX	3.2	1.5	15	1534

Для выявления структуры течений озера использовались методы корреляционного и спектрального анализа. В рамках этого анализа рассчитывались оценки нижеследующих статистических характеристик.

1. Автокорреляционной функции:

$$K_x^*(p) = \frac{1}{Np} \sum_{k=0}^{Np} \dot{x}_k \dot{x}_{k+p},$$

где \dot{x}_k , x_{k+p} – члены реализации; $N = T_h/\Delta t$ – число членов реализации; Δt – интервал квантования по времени; $p = 0, 1, 2, \dots, m$.

2. Нормированной автокорреляционной функции:

$$R_x^*(\tau) = \frac{K_x^*(\tau)}{K_x^*(0)}.$$

3. Спектральной плотности:

$$S_x^*(\omega) = \frac{\Delta \tau}{\pi} \sum_{p=0}^m \delta(p) K_x^*(p) \cos \frac{\pi p k}{m \Delta \tau},$$

где $\delta(p) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 > p > m \\ 1/2 & \text{при } p = 0, p = m; \\ 1 & \text{при других } p \text{ в интервале } (0, m) \end{cases}$

$p = 0, 1, 2, \dots, m$; m - число ординат автокорреляционной функции; $k = 0, 1, 2, \dots, \ell$; ℓ - число вычисляемых ординат $S_x^*(\omega)$; $\Delta \tau$ - дискретность оценки автокорреляционной функции.

Сглаживание оценки спектральной плотности производилось с помощью весовых коэффициентов Хамминга:

$$\tilde{S}_x^*(\omega) = 0.23 S_x^*(\omega_{k-1}) + 0.54 S_x^*(\omega_k) + 0.23 S_x^*(\omega_{k+1}).$$

4. Функции взаимной корреляции:

$$K_{xy}(p) = \frac{1}{N_{x-p}-2} \sum_{i=0}^{N_{x-p}} x_i y_{i+p},$$

$$K_{yx}(p) = \frac{1}{N_{x-p}-2} \sum_{i=0}^{N_{x-p}} y_i x_{i+p},$$

где $p = 0, 1, 2, \dots, m_\beta$ - переменный дискретный сдвиг.

5. Нормированной функции взаимной корреляции:

$$R_{yx}(\tau) = \frac{K_{yx}(\tau)}{\sqrt{K_x(0) K_y(0)}},$$

$$R_{yx}(\tau) = \frac{K_{xy}(\tau)}{\sqrt{K_x(0) K_y(0)}}.$$

6. Взаимной спектральной плотности:

$$\text{Ко-спектр} - C_{xy}(\omega) = \frac{\Delta \tau}{2\pi} \sum_{p=0}^{m_\beta} \sqrt{\delta_p} \lambda_p L \cos \frac{\pi k p}{m_\beta},$$

$$\text{Ку-спектр} - Q_{xy}(\omega) = \frac{\Delta \tau}{2\pi} \sum_{p=0}^{m_\beta} \sqrt{\delta_p} \lambda_p M \sin \frac{\pi k p}{m_\beta},$$

где $L = K_{xy}(0) + K_{yx}(0)$; $M = K_{xy}(0) - K_{yx}(0)$.

7. Когерентности:

$$F(\omega_i) = \sqrt{\frac{\tilde{C}_{xy}^2(\omega_i) + \tilde{Q}_{xy}^2(\omega_i)}{S_x(\omega_i) S_y(\omega_i)}}.$$

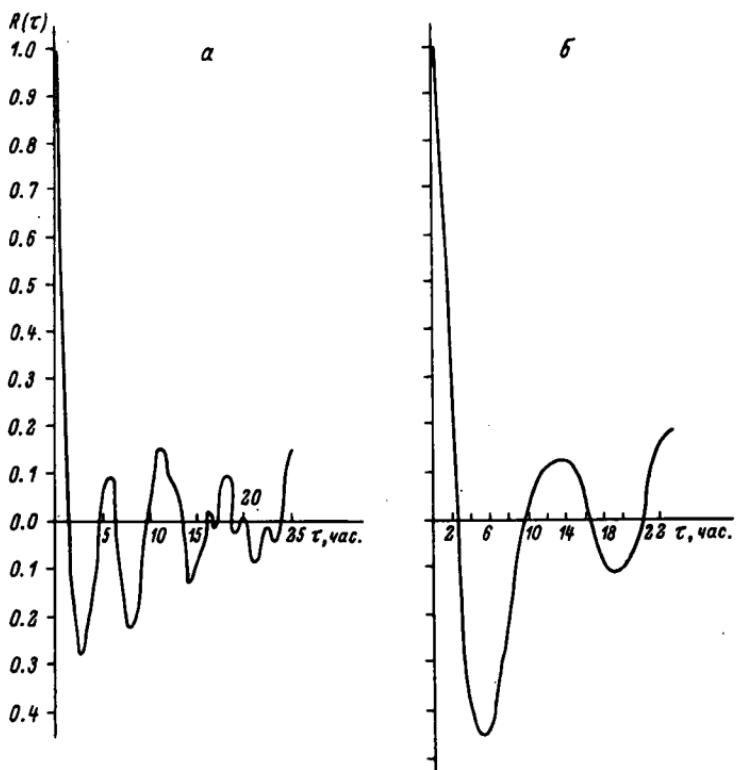


Рис. 42. Автокорреляционные функции составляющих течений (а) и ветра (б) на параллель АБС-1 (горизонт 3.0 м).

8. Разности фаз:

$$\theta_{xy}(\omega_i) = \arctg \frac{Q_{xy}(\omega_i)}{C_{xy}(\omega_i)} .$$

Более подробное описание методов анализа случайных процессов можно найти в книге Дж. Бендата и А. Пирсона (1971). Для устранения нестационарности по математическому ожиданию применено скользящее осреднение и полиномиальное выравнивание (Рожков, 1966). По всем реализациям рассчитаны автокорреляционные функции и автоспектры составляющих течений и ветра на меридиан (u) и параллель (v).

Примеры автокорреляционных функций и спектров приведены на рисунках 42 и 43. В спектрах течений можно выделить несколько энергонесущих максимумов, точнее группы, так как вследствие различных значений дискретности спектра $\Delta\omega$ частоты энергонесущих

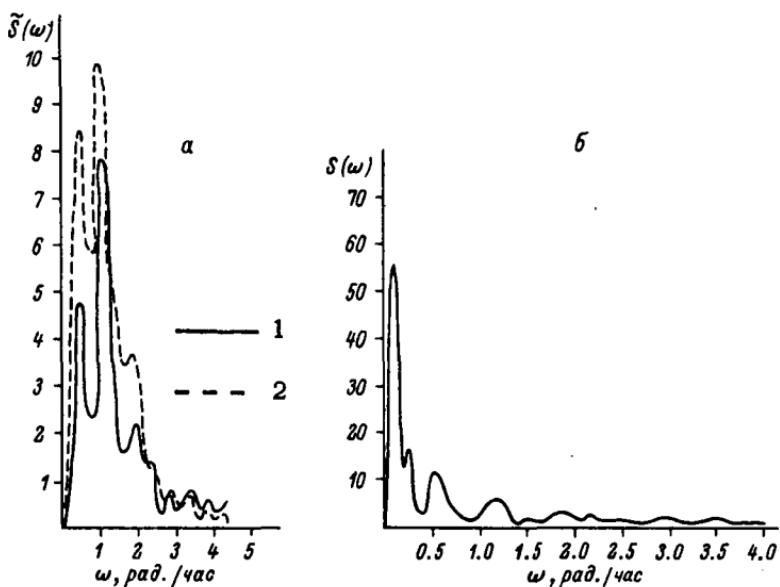


Рис. 43. Спектры составляющих течений.

а - 20-26 VІ 1974 г.; б - 18 VII 1974; 1 - на глубине 3.0 м;
2 - на глубине 1.5 м.

максимумов не совпадают. Первая группа располагается в „неразрешенной“ области спектра. Это максимумы на частотах 0.045 (~ 6 суток), 0.097 (~ 2.5 суток) и 0.145 рад./час (~ 2 суток). Вторая группа частот - 0.24-0.27 рад./час (~ 1 сутки). Третья энергонесущая область расположена на участке спектра 0.45-0.60 рад./час (~ 0.5 суток). Можно также выделить еще три энергонесущих области на частотах: 0.967-1.211 (6.5-5.2 часа), 1.41-2.06 (4.3-3.0 часа) и 2.64-4.24 рад./час (2.4-1.5 часа). Перейдем к объяснению физической сути основных энергонесущих областей. Строго говоря, мы не можем оценивать низкочастотные компоненты спектра (шестисуточные колебания) по реализациям длительностью всего 15 суток. Но есть основания предполагать, что такие колебания имеют место и обусловлены они естественным синоптическим периодом изменения метеорологических полей ветра и атмосферного давления. Для подтверждения этого необходим анализ рядов наблюдений не менее 60-70-суточной продолжительности. Обнаруженные флуктуации течений с периодами, близкими к суткам (0.24-0.27 рад./час), и наличие энергомаксимума на этой же частоте в спектре ветра, позволяют сделать предположение, что эти колебания связаны с бризами, возникающими вследствие неравномерного прогревания подстилающей поверхности.

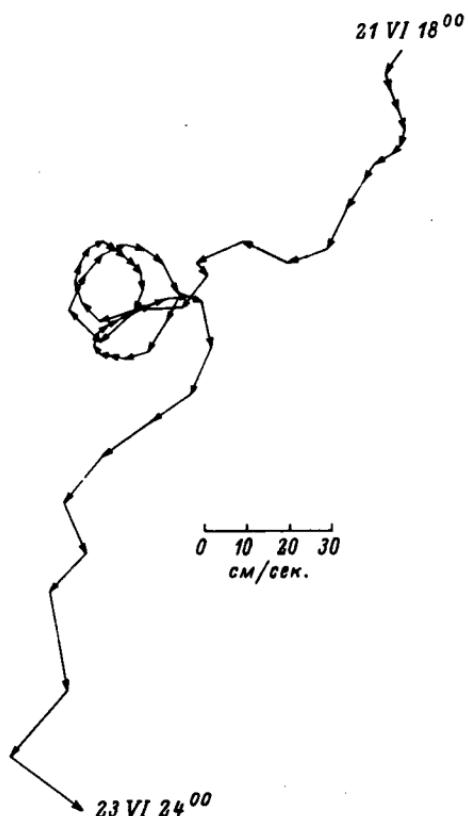


Рис. 44. Прогрессивно-векторная диаграмма течений по показаниям АБС-1 (горизонт 3,0 м).

В третьей выделенной нами группе наибольший интерес представляет максимум на частоте 0,45 рад./час, которому соответствуют флуктуации с периодом около 14 час, т.е. близким к периоду инерционных колебаний для широты оз. Кубенского. Считается, что в мелководных водоемах влияние инерционных сил мало по сравнению с силами трения о дно (Фельзенбаум, 1960). Не обнаружил колебаний с инерционным периодом и Ф.Ф. Воронцов при исследовании структуры течений оз. Красного (1975). Однако в спектрах течений оз. Кубенского этот период наблюдается.

В пользу существования в отдельные периоды инерционных течений свидетельствуют прогрессивно-векторные диаграммы. Одна из таких диаграмм представлена на рис. 44. Наличие ряда спиралей в целом прямолинейном ходе диаграммы показывает, что наряду с основными силами, вызывающими течения, иногда значительны и инерционные силы, создающие вращательное движение по часовой стрелке. Период этих спиралей - 12-14 час. Поскольку мелководные водоемы с точки зрения структуры их течений изуче-

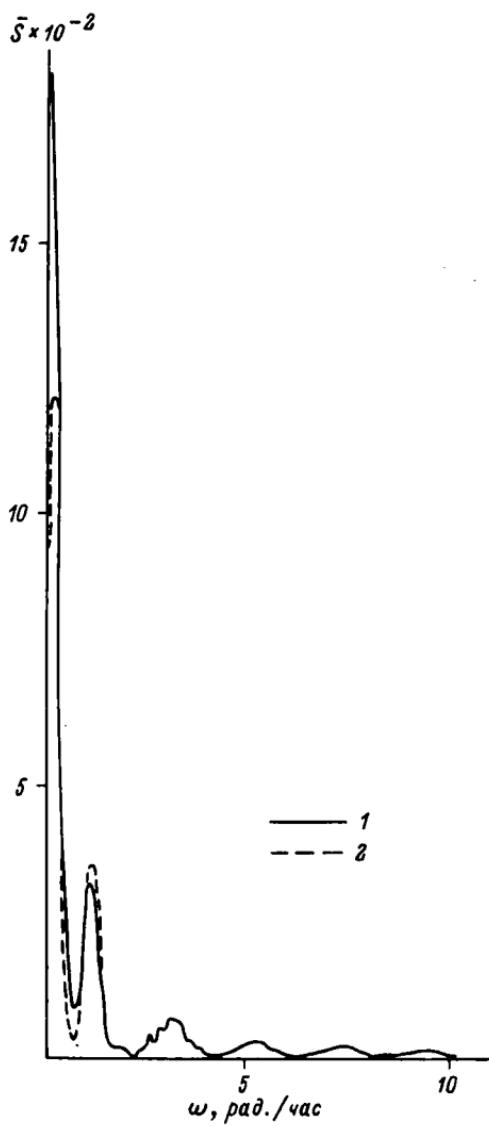


Рис. 45. Спектр колебания уровня озера.

1 – в/п Прилук; 2 – в/п Пески.

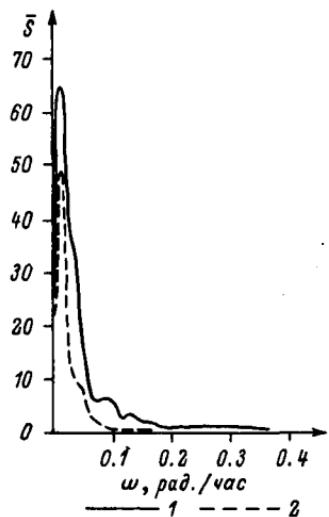


Рис. 46. Спектр модулей скоростей течений.

1 - 18 VII-02 VIII 1974; 2 - 30 VIII 1974 г.

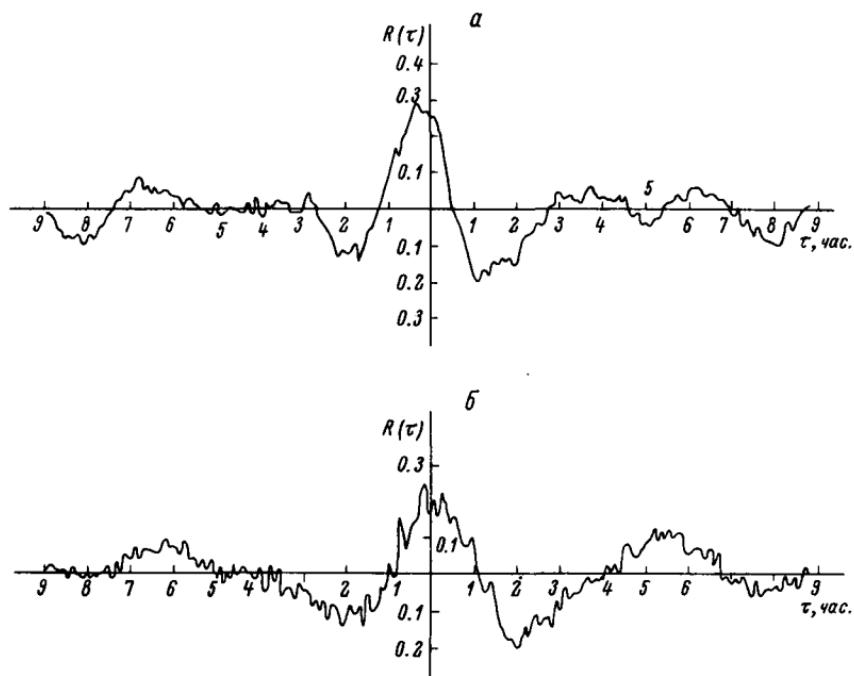


Рис. 47. Взаимокорреляционные функции составляющих течений по показаниям АБС -1 (горизонты 1.5 и 3.0).

а - составляющие на меридиан; б - составляющие на параллель.

Т а б л и ц а 49

Разность фаз для спектров, составляющих течение
на доминирующих частотах

ω	u		v	
	0°	T^\hbar	0°	T^\hbar
0.25-0.29	230	~ 19.5	187	~ 13.0
0.46-0.49	284	~ 11.0	187	~ 7.0
0.98-1.05	321	~ 5.4	347	~ 5.8

ны еще недостаточно, выяснение природы колебаний с периодом 13-14 час. в спектрах течений требует еще дальнейших исследований. Прогрессивно-векторные диаграммы, кроме того, показывают, что в направлении придонного течения преобладает южная составляющая. Это еще раз подтверждает наличие в озере постоянного течения, направленного в сторону истока из озера.

Энергонесущая область на частотах 0.97-1.21 рад./час (период 5-6.5 часа) обусловлена влиянием сейшевых колебаний уровня. Период сейш на оз. Кубенском (разд. 4.3, наст. изд.) равен 5-6 час. Присутствие этой области характерно для всех рассчитанных спектров течений, и уровень энергии на этих частотах сопоставим с другими доминирующими компонентами, а в некоторых спектрах даже близок к максимальному. Это свидетельствует о значительной роли колебаний уровня в формировании течений озера. Иллюстрацией „сейшевого“ происхождения рассматриваемых флуктуаций может служить спектр уровня оз. Кубенского (рис. 45), а как косвенное доказательство – отсутствие энергомаксимума на частотах 0.97-1.21 рад./час в спектрах модуля скорости течений (рис. 46). Высокочастотная часть спектра отражает вклад энергии турбулентных пульсаций. Выделить статистически значимые энергонесущие области на этом участке спектра не удалось, так как периоды флуктуаций имеют переменный характер, а уровень энергии невелик. В большинстве случаев участки спада энергии законом „степени 5/3“ не аппроксимируются.

Взаимнокорреляционные функции двух 5-суточных реализаций на горизонтах 1.5 и 3.0 м (рис. 47) свидетельствуют о малой степени связи между горизонтами. Основной причиной этого является разновременность взаимодействия флуктуирующих компонент процесса (табл. 49).

Когерентность на рассматриваемых частотах превышает доверительный уровень и тем самым свидетельствует о наличии тесной связи между соответствующими спектральными компонентами.

Совместный анализ характеристик течений и ветра, к сожалению, не дал хороших результатов, что объясняется искусственной

интерполяцией характеристик ветра, к которой пришлось прибегнуть ввиду большой дискретности наблюдений над ветром (3 часа). Такая интерполяция не могла не исказить естественный ход изменения характеристик ветра. Очевидно, для такого рода анализа необходимы непрерывные ряды наблюдений над ветром, полученные с помощью самописцев.

Таким образом, результаты корреляционного и спектрального анализов течений выявили довольно сложную и изменчивую структуру процесса. Спектральный анализ позволил выделить ряд энергосущих областей с определенными периодами флуктуаций, что позволило высказать ряд положений о причинах того или иного вида колебаний.

Стоковые течения озера

Речной поток, втекающий в озеро, представляет собой постепенно расширяющуюся турбулентную струю, обладающую определенным запасом кинетической энергии. Скорости течения в речной струе, как правило, значительно превышают скорости течения в водоеме. Между струей и окружающей жидкостью происходит непрерывный обмен массами. От речной струи отделяются объемы воды, переносящие импульс в окружающую среду и приводящие в движение водные массы озера. Взамен этих объемов в речную струю проникают озерные воды, которые тормозят движение речных вод по боковым пограничным поверхностям. В результате взаимодействия речных и озерных вод происходит уменьшение скорости течения вдоль речной струи, увеличение ее ширины и расхода воды в ней, а также разбавление речных вод. Для масс воды, охваченных стоковым течением, характерно образование водоворотных зон, или циркуляций с вертикальной осью. Эти области могут возникать по обе стороны от основного потока и иметь различный знак.

Из опыта исследований стоковых течений на ряде внутренних водоемов известно, что уклон, создаваемый притоком и стоком, в большинстве случаев практически неощутим. Поэтому и скорости стоковых течений большую часть времени имеют небольшие значения. Стоковые течения являются как бы фоном, на котором развиваются другие виды течений. Скорость, ширина и дальность распространения стоковых течений в водоеме зависят главным образом от соотношения между объемами воды – поступающей в водоем и уже скопившейся в нем, т.е. коэффициента условного водообмена

$K_B = \frac{W_{пр}}{W_B}$ (Григорьев, 1958). Кубенское озеро имеет условный водообмен около 4 и его следует отнести к группе аккумулятивно-транзитных водоемов. В водоемах этого типа транзит выражен слабо. Стоковые течения в них прослеживаются на отдельных участках, причем в местах впадения реки наблюдается затухающее, а в истоке – нарастающее течение. За пределами впадения реки вода дви-

жется не сплошным потоком, а постепенно растекается. Для характеристики внутреннего водообмена озера необходимо учитывать еще тип проточности водоема. Под типом проточности понимается направление главного потока — реки в озере, — определяемое местом входа его и выхода (Григорьев, 1958). Оз. Кубенское имеет „поперечно-боковой“ тип проточности, который характеризуется тем, что направление основного притока (р. Кубена) и вытекающей из озера реки (р. Сухона) составляет угол около 90° . В озерах такого типа активная зона водообмена, обусловленная стоковыми течениями, расположена в части озера между рекой, впадающей в озеро, и рекой, вытекающей из озера. Таким образом, для оз. Кубенского зоной более активного водообмена, обусловленного притоком речных вод, будет являться южная и юго-восточная его части.

В 1973-1974 гг. проводились специальные работы по исследованию распространения стока в озере от главных притоков — рек Кубены, Уфтуги и Порозовицы, а также исследовались течения в истоке р. Сухоны. Помимо непосредственных измерений характеристик течений, использовался косвенный показатель течений — электропроводность воды.

Река Кубена. Средний годовой многолетний расход реки, приведенный к устью, составляет $100 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Наибольшие средние месячные расходы воды приходятся на май и составляют, по средним многолетним данным, $445 \text{ м}^3/\text{сек.}$ В период прохождения пика весеннего паводка, который бывает в первую декаду мая, расходы увеличиваются в отдельные годы до 1000 - $1500 \text{ м}^3/\text{сек.}$ При впадении в озеро река образует ряд рукавов и протоков.

Наблюдения в устье реки и прилегающем районе озера проводились эпизодически в период с мая по сентябрь. Стоковые течения в части озера, примыкающей к устью, под влиянием ветровых течений и в зависимости от направления последних могут отклоняться в ту или иную сторону. В штилевую погоду воды Кубены расходятся в озере как бы веером: часть воды вдоль северо-восточного берега направлена к р. Сухоне, часть — к фарватеру, и, наконец, преимущественно в придонных горизонтах, — к о. Каменный. Скорости течения, как показывают наблюдения, не превышают $4 \text{ см}/\text{сек.}$, часто их значения находятся на уровне чувствительности приборов. При попутных ветрах происходит наложение дрейфового течения на стоковое, что приводит к некоторому увеличению скоростей течений. Так, при ветрах с северной составляющей, т.е. ССВ и ССЗ, речные воды р. Кубены, распространенные до фарватера, направлены к р. Сухоне (рис. 39, б). Скорости течения даже при несильном попутном ветре ($5 \text{ м}/\text{сек.}$) увеличиваются за счет наложения на чисто стоковые течения ветровой составляющей. Как показали наблюдения, в устье Кубены скорости течения составляют 7 - $10 \text{ см}/\text{сек.}$, а в весенне полноводье (16 V 1974 г.) — до $45 \text{ см}/\text{сек.}$ При выходе в озеро скорости стокового течения

быстро затухают и уже на расстоянии 4–5 км от устья скорость суммарного течения не превышает 6 см/сек.

При ветрах, направленных навстречу течению реки, образуется зона схождения стокового и ветрового течений, местоположение которой в зависимости от направления, скорости и продолжительности действия ветра и расхода воды в реке смещается.

Река Уфтуга – второй по величине приток в оз. Кубенское. Средний годовой ее расход (по многолетним данным) составляет $11.6 \text{ м}^3/\text{сек.}$. В половодье он увеличивается до $57 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (средний месячный расход за май). Как показали наблюдения, в прилегающем к устью реки районе озера в штилевую погоду наблюдается очень слабое течение реки, скорости которого не превышают 3–5 см/сек. во всей водной толще. При устойчивых ветрах северо-западного и северо-восточного направлений, т.е. ветрах, дующих по направлению течения реки, скорости в устье увеличиваются до 20 см/сек., но по мере удаления от устья они быстро затухают. Так, в 1.5 км от устья скорости течения составляют уже 8 см/сек. (рис. 39, б). Даже при незначительном встречном ветре (юго-восточном) скорость течения от реки в прилегающем районе озера уменьшается настолько, что практически не улавливается приборами, и только в придонном горизонте достигает 7 см/сек.

Таким образом, р. Уфтуга, имеющая значительно меньшие расходы воды, чем р. Кубена, не оказывает большого влияния на озеро, тем более, что она владает в обособленную его часть.

Река Порозовица – маловодный приток озера: средний многолетний годовой расход всего около $8 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (разд. 3.1, наст. изд.). Как показали наблюдения, при попутных течению реки ветрах (северо-западных) в устье реки фиксируется сравнительно сильное течение в озеро, имеющее на поверхности скорости 20 см/сек., а у дна – 14 см/сек. При выходе в озеро скорость течения быстро затухает: так, в 1 км от устья на поверхности она уже 12 см/сек., в 3 км – 8 см/сек. (рис. 39, б). При встречных течению реки ветрах (юго-западных) скорости течения в устье значительно снижаются, не превышая 4–5 см/сек. Несмотря на свою маловодность, р. Порозовица оказывает постоянное воздействие на озеро через посредство образованного ее водами в средней части озера слабого, но устойчивого придонного течения, направленного к истоку из озера – р. Сухоне.

Река Сухона – единственная артерия стока из оз. Кубенского. Исследования в прилегающем к истоку реки районе озера показывают, что в штилевую погоду скорости течений не превышают 3–5 см/сек. При сравнительно несильном (до 3 м/сек.) юго-восточном ветре, т.е. попутном течению реки, скорости в ее устье достигают 20–25 см/сек., а в прилегающем к истоку реки районе озера течение направлено в реку, но скорости его значительно меньше: в 1.5–2.0 км от истока они уже не превышают 10 см/сек. При встречных течению реки (ССВ) и сравнительно силь-

ных (7 м/сек.) ветрах в районе р. Сухоны могут возникать в поверхностном слое обратные течения – из реки в озеро, – скорость которых не превышает 5 см/сек.; сток в реку при таких условиях осуществляется в придонных горизонтах.

Надо отметить, что годы работы экспедиции (1972–1974 гг.) являлись маловодными, особенно 1973 г., когда в летний период уровень в озере был на 80–84 см ниже среднего многолетнего за летний период (разд. 3.4, наст. изд.). Отсюда можно предположить, что в средние по водности и многоводные годы стоковые течения от главных притоков в озеро будут выражены больше.

Косвенные показатели распространения речных вод в озере

В практике гидрологических работ электропроводность используется в качестве показателя водных масс, как наиболее консервативный элемент. Данные по электропроводности воды, которая определялась одновременно с измерениями течений, показывают, что р. Кубена в штилевую погоду растекается как бы веером, а при ветре ее потоки в основном направлены вдоль берега и в зависимости от его силы и направления следуют широкой или узкой полосой в сторону р. Сухоны. В придонном горизонте речные воды направлены к о. Каменному. По значениям электропроводности воды и по донным отложениям воды р. Кубены прослеживаются до середины озера. О том, насколько быстро речные воды р. Уфтуги смешиваются с озерной водой, свидетельствуют данные по электропроводности воды. При северо-восточном сгонном ветре значение электропроводности воды падает с 350 до 203 мксим./см, т.е., выйдя из русла, река, разливаясь по зарослям, разбавляется озерной водой (разд. 4.5, наст. изд.). Влияние реки, по данным электропроводности воды, распространяется примерно на расстояние до 2 км от устья реки. Речные воды фиксируются отчетливее вдоль северо-восточного берега, который не дает им растекаться. По данным электропроводности влияние на озеро р. Порозовицы проследить не удалось.

Теоретический расчет стоковых течений

Нами был выполнен расчет поля скоростей течений в озере, создаваемого р. Кубеной, по методу Н.А. Давтян (1974). Метод основан на анализе натурных и экспериментальных данных, которые позволили установить, что уменьшение скорости течения вдоль речной струи зависит от величины начальной скорости, поперечных размеров струи в начальном створе, рельефа дна водоема, а также от суммарных потерь энергии в речной струе на трение о дно и

боковые поверхности. Расчетное уравнение распределения средней скорости течения вдоль речной струи имеет следующий вид:

$$V_{0x} = V_0 e^{-k\beta},$$

где $\beta = \frac{xH}{B_0 H_0}$, $k = 0.38\beta^{-0.60}$; V_{0x} – средняя скорость течения в речной струе на расстоянии x от начального створа; V_0 , H_0 , B_0 – соответственно средняя скорость, глубина и ширина в начальном створе; H – средняя глубина на участке растекания струи; k – эмпирический коэффициент, интегрально учитывающий потери энергии в речной струе на трение о дно и боковые поверхности.

Приближенные вычисления планового распределения скоростей течения в водоеме на участке впадения речного потока производились по зависимости

$$V = 2 V_0 e^{-\beta(k + 2a \frac{Z}{x})},$$

где a – коэффициент, учитывающий трансформацию эпюры скоростей течения в направлении движения ($a = 2.8\beta^{-0.90}$); Z – расстояние от осевой линии потока по ширине струи.

Расчет ведется по отдельным участкам. В пределах каждого участка глубина H принята постоянной. Для определения скорости течения в замыкающем створе каждого участка за начальную скорость принимается скорость в начальном створе этого участка.

Определение вероятной зоны распространения самого большого по водности притока в оз. Кубенское – р. Кубены – было выполнено по вышеприведенным формулам. В качестве исходных данных принимались скорости течения в устье реки, соответствующие многолетнему среднему годовому расходу ($V_0 = 17$ см/сек.); многолетнему среднему месячному расходу за май – месяц наибольшего притока воды в озеро ($V_0 = 32$ см/сек.); и, наконец, максимальному среднему месячному расходу за май ($V_0 = 62$ см/сек.). Расчеты распространения речных вод выполнены для случая отсутствия озерных течений, т.е. для штилевой погоды. Считалось, что граница проникновения речной воды в озеро располагалась на расстояниях x от начального створа, где средняя по ширине скорость речной струи составляла 2–3 см/сек.

Как показали расчеты, наиболее интенсивное уменьшение скоростей течений вдоль струи наблюдается в пределах первого километра, а затем происходит более медленное убывание скоростей. Протяженность распространения речной струи в озере зависит от скорости течения на начальном створе (рис. 48). Так, речные воды р. Кубены, втекающие в водоем со скоростью 63 см/сек., проникают в озеро примерно на расстояние 4 км, при начальной скорости 17 см/сек. – всего на 1.5 км. На рис. 49 приведено

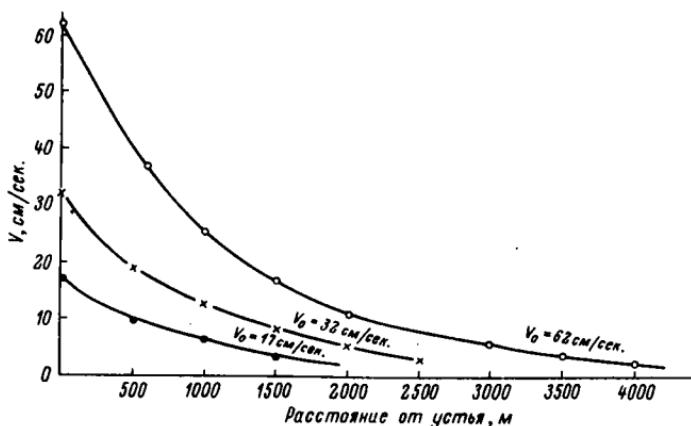


Рис. 48. Изменение средней скорости речной струи р. Кубены в приустьевом участке озера.

плановое распределение средней скорости течения в речной струе на приустьевом участке озера. Из рисунка видно, как быстро уменьшаются скорости стокового течения по мере удаления от устья реки не только по оси потока, но и по его ширине.

Данные расчетов скоростей течений в речной струе р. Кубены при впадении ее в озеро согласуются с данными натурных наблюдений. Как уже отмечалось выше, в штилевую погоду измеренные скорости течения на расстоянии 500–1000 м не превышают 4 см/сек. Если учесть, что измерения проводились в периоды, когда скорость течения в устье р. Кубены (начальная скорость) не превышала 10 см/сек., то порядок измеренных скоростей близок к полученным в результате расчета. Измерения, проведенные в мае 1974 г. (в период половодья), когда скорость течения в устье реки составляла 45 см/сек., показывают, что на расстоянии 4–5 км от устья скорости течения – 5–6 см/сек., что несколько выше расчетных. Это объясняется тем, что расчетная скорость – это скорость чисто стокового течения, а измеренная скорость – скорость суммарного течения (стокового и ветрового).

Таким образом, примененный метод расчета стоковых течений дает вполне сопоставимые результаты сатурой и, учитывая сравнительную несложность его практического применения, может с успехом использоваться в вопросах исследования зон распространения речных вод в водоемах.

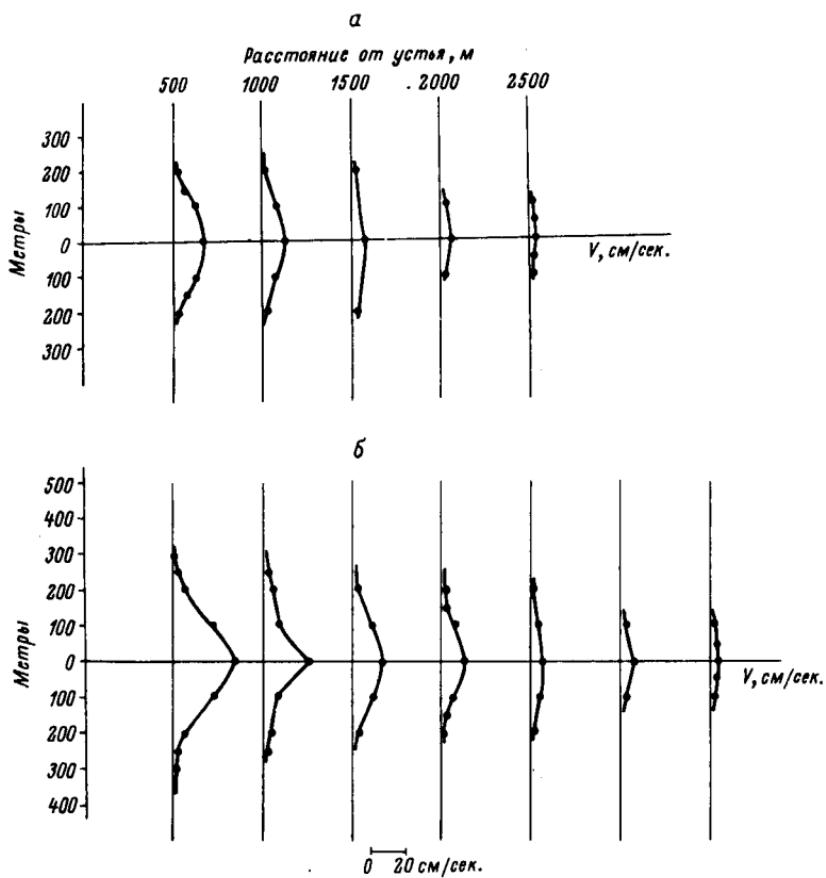


Рис. 49. Плановое распределение скорости течения в речной струе р. Кубены в приустьевом участке озера.

а - $V_0 = 32 \text{ см/сек.}$; б - $V_0 = 62 \text{ см/сек.}$

4.3. С е й ш и

Образование сейш на озерах обусловлено одновременным распространением в противоположных направлениях длинных волн, причем длина каждой из них должна быть в два раза больше длины озера. В результате появляется „стоячая“ волна, которая характеризуется колебаниями воды вверх-вниз на концах озера (с противоположными знаками). Примерно посередине озера (при одноузловой сейши), располагается узловая линия, где отсутствуют вертикальные колебания уровня, но зато максимально развиты горизонтальные движения воды.

Причины образования сейш довольно разнообразны. Это и неравномерное распределение давлений на концах озера и сильный нагон или сгон воды. В литературе указываются и другие причины, вызывающие сейши, — шквалы и порывы бури, имеющие местный характер, воздушные волны, если их направление совпадает с продольной осью озера и, наконец, землетрясения. Впрочем, нет необходимости отыскивать особые причины для образования сейш. По мнению Эмдена (Оболенский, 1919), энергия, достаточная для их образования, столь невелика, что в природе ее запасов всегда с избытком. Дождь, даже очень слабый, незначительное изменение давления, легкое сотрясение земли, напор ветра умеренной силы — все это может быть причиной возникновения сейш.

Следовательно, водная масса озер почти постоянно находится в колебательном движении, что не может не оказать влияния на гидрологический режим. Основным механизмом, через посредство которого осуществляется это влияние, являются сейшевые течения, которые попрежнему (согласно периоду сейш) меняют свое направление то в одну, то в другую сторону. Такие ритмические течения, особенно усиливающиеся в узких проливах, оказывают воздействие на образование и толщину ледового покрова, форму отдельных участков берега, перенос количества тепла, химических элементов и различных взвесей.

Отдельные опубликованные работы содержат некоторые сведения о сейшевых течениях (Тихомиров, 1958, 1969; Верболов и др., 1965), но пока они единичны. В то же время изучением сейш исследователи занимаются очень давно. Этому вопросу посвящена обширная зарубежная литература (Hutchinson, 1957), чего нельзя сказать об отечественной. На данный момент о сейшах на озерах Советского Союза, притом в основном на наиболее крупных, написано немногим более десятка работ. В нихходим сведения о сейшах таких значительных водоемов, как Аральское море (Берг, 1908; Ремезова, 1937), Байкал (Соловьев, 1926), Севан (Зайков, 1933), Ладожское и Онежское (Малинина, 1966, 1972). В большой мере сократил пробел в отечественной гидрологической литературе о сейшах выход в свет монографии Н.М. Арсеньевой, Л.К. Давыдова и др. (1963), где, кроме упомянутых озер, приводятся сведения о сейшах еще для пяти.

Изучением сейш на оз. Кубенском до нас никто не занимался, хотя озеро давно используется человеком (рыбный промысел и судоходство) и наблюдения за его уровенным режимом проводятся уже с конца прошлого столетия, но все они лишь речевые двухстрочные. На озере еще ни разу не был установлен ни один самописец уровня воды. Изучение сейш представляет нелегкую задачу прежде всего потому, что сейши никогда не бывают одиночными, а состоят из серии колебаний. Первая волна отличается наибольшей амплитудой, следующие — все меньшей и меньшей. На лимнограмме редко фиксируется гармоническое колебание в чистом виде. Обычно наблюдается наложение нескольких колебаний с различной амплитудой

и периодами. На сейшевые колебания накладываются непериодические колебания уровня. Все эти обстоятельства существенно осложняют задачу расчета величины амплитуды сейш и выделение их периодов.

Чтобы лучше разобраться в этом сложном явлении, многие исследователи стали предварительно изучать сейши в лабораторных условиях на моделях озер (Форель, 1895; Соловьев, 1926; Арсеньева, Давыдов, 1963, и др.) либо рассчитывать возможные сейши, пользуясь теоретическими формулами. В настоящее время, после того как при помощи ЭВМ стало возможным использовать теоретические методы расчета, широкое распространение получило математическое моделирование. Теории сейш посвящено немало работ, особенно за рубежом. Одной из первых следует назвать работу Мериана (Merian, 1828), в которой, хотя она и не посвящена специальности сейшам, была выведена формула для стоячих колебаний жидкости в прямоугольном сосуде постоянной глубины, позднее использованная Форелем (Forel, 1895) для расчета сейш Женевского озера. Несмотря на то что она рассчитана на водоемы практической идеальной формы — одинаковой ширины и глубины, что в природе встретить довольно трудно, ее использование для реальных водоемов также дает неплохие результаты. Наиболее полную и точную теорию сейш разработали Кристал, Дефант, Праудмен и др. Сводка об этих работах приводится в упомянутых ранее монографиях Хатчинсона (Hutchinson, 1957) и Н.М. Арсеньевой, Л.К. Давыдова и др. (1963).

Из всех существующих методов расчета наиболее широко применяются формула Мериана и метод Дефанта. В настоящей работе также использованы эти два способа; последний из них, кроме периода сейш, позволяет определять еще и положение узловой линии, а также соотношение уровня на концах озера. Для изучения сейш оз. Кубенского в течение летних периодов 1972–1974 гг. на озере в трех пунктах — деревнях Пески и Прилуки, а также на о. Каменном — устанавливались самописцы уровня „Валдай“. К сожалению, в деревнях Пески и Прилуки, т.е. на концах озера, самописцы одновременно действовали только в 1974 г.

В дальнейшем составление характеристики сейш оз. Кубенского шло двумя путями: расчет периода возможной одноузловой продольной сейши озера при помощи теоретических формул и определение периода и амплитуды сейш по натурным наблюдениям.

Расчет периода одноузловой продольной сейши

Для расчета периода одноузловой продольной сейши оз. Кубенского использованы формула Мериана и метод Дефанта. Сразу же следует заметить, что период одноузловой продольной сейши этого озера может менять свои значения в отличие от периодов сейш,

Т а б л и ц а 50

Периоды одноузловой продольной сейши оз. Кубенского,
рассчитанные по формуле Мериана

Отметка уровня, м	Длина озера, м	Средняя глубина, м	Период сейши, час.мин
108.00	53600	1.37	8 ⁰⁶
109.00	53900	2.14	6 ³⁰
110.00	54000	2.94	5 ³⁶
111.00	54100	3.04	5 ³⁰
112.00	56800	3.46	5 ¹⁸

скажем, таких озер, как Ладожское, Онежское, Байкал. У больших и глубоких озер период одноузловой продольной сейши имеет одно постоянное значение, которое определяется соотношением его длины и средней глубины, поскольку и длина и средняя глубина таких озер практически не меняются. В действительности с изменением уровня озер какие-то изменения его длины и глубины происходят, но для больших озер они столь малы (у Ладожского озера, например, с изменением уровня на 2 м его длина изменяется менее чем на 0.01%, а глубина во много раз меньше), что не оказывают никакого воздействия на изменение периода сейш.

Другое дело у озер, подобных Кубенскому. В течение года отметка его уровня может меняться от 112 до 108 м. При этом значительно меняется как длина озера, так и средняя глубина; последняя при высоком уровне увеличивается в несколько раз. Эти изменения сказываются на величине периода сейш. Рассчитанный по формуле Мериана период одноузловой продольной сейши оз. Кубенского может в течение года менять свое значение от 5 до 8 час. (табл. 50). Поэтому очень важно, приводя сведения о периоде сейш оз. Кубенского, указывать, к какому уровню озера они относятся. Сделанные расчеты периода сейш помогли впоследствии разобраться в наблюденных данных при обработке лент лимнографа.

Для дальнейшего уточнения периода одноузловой сейши озера был применен метод Дефанта. Этот метод основан на гидрологической теории сейш, разработанной Кристалом. Дефант рассматривает сейши как свободные колебания и описывает их при помощи дифференциальных уравнений, не учитывающих силы трения и геострофического ускорения. Для расчета сейш этим методом план озера разбивается на участки, более или менее равные, и для каждого поперечного сечения при заданном периоде сейш рассчитывается

расход воды и величина изменения уровня. Если период сейш выбран верно, то на концах озера в пучностях сейши расход должен быть равен нулю, а в узловой линии его значение будет максимальным. Уровень же, наоборот, максимальные отклонения (с противоположными знаками на концах озера) будет иметь в пучностях. Расчеты методом Дефанта при постепенном изменении величины периода продолжаются до тех пор, пока не будут удовлетворены вышеупомянутые условия. Для ручного счета метод Дефанта чрезвычайно громоздок, но с использованием ЭВМ его применение значительно упростилось.

Н.О. Солнцевой (Малинина, Солнцева, 1972) еще при изучении сейш Онежского озера была составлена программа для ЭВМ по расчету периода одноузловой продольной методом Дефанта. В настоящей работе она использована и для расчета сейш оз. Кубенского. Период одноузловой продольной сейши рассчитывается для отметки уровня 110 м. План озера был разбит на 15 участков и для каждого определены морфометрические показатели. Рассчитанный методом Дефанта период одноузловой продольной сейши оз. Кубенского оказался равным 5 ч. 25 м. Установленное положение узловой линии – между 5 и 6 поперечниками, ближе к северо-западному берегу озера. Высота сейши в районе д. Пески примерно на 20% меньше, чем у юго-восточного берега. Получив таким образом величину возможного периода одноузловой продольной сейши оз. Кубенского, можно приступить к анализу данных непосредственных наблюдений.

Периоды и амплитуды сейш по материалам наблюдений

При наблюдении над сейшами на озерах очень важно правильно расположить самописец уровня. Лимнограф, находящийся вблизи узловой линии, где уровень озера почти не меняется, не зарегистрирует сейш. Установленные в бухтах и заливах самописцы дают очень сложные записи, так как кроме основной, озерной, они фиксируют еще и собственные сейши. Оказывают воздействие на развитие сейш любые непериодические колебания уровня.

Для изучения сейш оз. Кубенского самописцы уровня устанавливались на концах его продольной оси (рис. 2). В д. Пески лимнограф работал с 6 по 22 июля 1972 г., с 5 июля по 8 августа 1973 г. и со 2 июля по 20 августа 1974 г.; в д. Прилуки – с 7 по 20 августа 1973 г. и с 15 июля по 22 августа 1974 г.

Дополнительно в 1972 г. с 10 июля по 2 августа лимнограф устанавливался на о. Каменном. Ленты самописцев были подвергнуты обычной статистической обработке, результаты которой представлены в табл. 51. Там же для сопоставления приведены величины периодов, сейш, вычисленные по формуле Мериана для тех периодов, когда действовали наши посты.

Т а б л и ц а 51

Периоды и амплитуда сейш на оз. Кубенском

Время наблюдений	Наблюденные				Рассчитанные по формуле Мериана, час. _{мин.}
	продолжительность наблюдений, час. _{мин.}	число волн	средний период, час.	амплитуда, см	
В/п Пески					
1972 г. УП	118 ²⁰	20	5 ⁵⁵	11	5 ³⁶
	8 ⁰⁰	10	0 ⁴⁸	12	
1973 г. VII	124 ²⁰	21	5 ⁵⁵	15	6 ⁰⁰
VIII	48 ⁴⁰	8	6 ⁰⁵	14	6 ²⁰
1974 г. VII	98 ⁵⁰	18	5 ³⁰	22	5 ³⁰
VIII	205 ⁰⁰	34	6 ⁰²	18	5 ⁵⁵
В/п Прилуки					
1973 г. VIII	81 ³⁰	14	6 ⁰⁸	13	
	23 ³⁰	7	3 ²⁰	7	
1974 г. VI	13 ⁰⁰	4	3 ¹⁵	6	
VII	151 ¹⁰	27	5 ³⁰	21	
	23 ²⁰	7	3 ²⁰	7	
VIII	65 ⁰⁰	12	5 ⁴⁰	12	
	21 ⁰⁰	6	3 ³⁰	6	
	19 ³⁰	18	0 ⁶⁵	5	
О. Каменный					
1972 г. VIII	47 ²⁰	8	5 ⁵⁵	4	
	59 ⁰⁰	46	0 ⁹⁰	6	
	50 ⁵⁰	71	0 ⁴³	7	

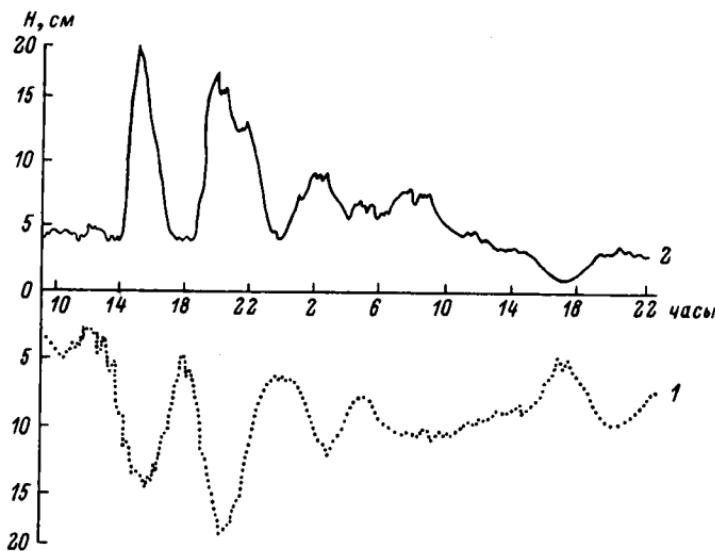


Рис. 50. Лимнография на водомерных постах Пески (1) и Прилуки (2) за 17-18 VII 1974 г.

При обработке лент самописцев прежде всего обращает на себя внимание то обстоятельство, что сейши на оз. Кубенском возникают почти постоянно. Правда, ряды сейш, как правило, очень короткие, так как сила трения (озеро очень мелкое) приводит к быстрому разрушению возникших волн. Величина периода сейш меняется в связи с изменением положения уровня озера. Период одноузловой продольной сейши в д. Пески меняется от 5 ч. 30 м. в июле 1974 г. до 6 ч. 05 м. в августе 1973 г. На этом же посту наблюдалась сейша с периодом 48 мин. На лентах лимнографа, установленного на противоположном конце озера, в Прилуках, одноузловая сейша также присутствует почти ежедневно. Ее период за время наблюдений менялся от 5 ч. 30 м. до 6 ч. 08 м. При сравнении лент одновременных наблюдений на этих постах, когда удалось это организовать, хорошо заметно, как уровень воды при развитии одноузловой продольной сейши в одном пункте растет, а в другом падает, и наоборот (рис. 50).

На лентах самописца, установленного в Прилуках, довольно отчетливо, хотя и не часто, фиксируется сейша с периодом около 3 ч. 20 м. – 3 ч. 30 м. и небольшой амплитудой, которую, вероятно, следует считать двухузловой сейшей озера. В августе 1974 г. сравнительно часто в Прилуках наблюдалась сейша с периодом около 1 часа. Возможно, что это многоузловая сейша озера. Ей соответствует и сейша с периодом, близким к указанному (48 мин.), наблюдавшаяся в Песках в июле 1974 г. при более высоком уровне воды, что и способствовало уменьшению ее периода.

Таблица 52

Высота сейш оз. Кубенского

Время наблюдения	Средний период сейши, час. ^{мин.}	Высота первой волны, мм	Высота последующей волны, % от первой					
			2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я
В/п Пески								
1972 г. 13-14 VII	5 ⁵⁵	78	44	38	40	35	30	18
1974 г. 22-23 VII	6 ⁰⁰	220	66	33	23	15	15	5
4 VIII	6 ¹⁰	180	50	33	15	15	10	
9-10 VIII	6 ⁰⁰	70	85	55	55	42	29	20
В/п Прилуки								
8 VII	5 ³⁰	190	60	36	15	10	10	
16 VII	5 ³⁵	150	73	33	13	13	12	
25 VIII	6 ⁰⁰	210	62	35	22	16	12	7

В течение месяца, как уже упоминалось выше, самописец уровня работал и на о. Каменном, вблизи устья р. Кубены. На лентах этого самописца обнаружены сейши с периодом около 6 час., т.е. одноузловая продольная. Следует отметить, что ее амплитуда очень мала, так как о. Каменный расположен в достаточной близости от узловой линии этой сейши. Кроме упомянутой, на этом посту наблюдались сейши с периодом 90 и 43 мин.

Высота сейш на оз. Кубенском сравнительно большая. Величина первой волны достигает 20–23 см, хотя следующие быстро уменьшаются вследствие малых глубин озера (табл. 52). Высота второй волны в среднем составляет примерно две трети от высоты первой, а следующая уже одну треть. Например, 22–23 июля 1974 г. в д. Пески наблюдалась серия сейш. Высота первой волны достигала 20 см, а шестой – всего 2 см. И несмотря на то что малые глубины озера способствуют быстрому затуханию амплитуды сейш, сейши возникают почти постоянно, так как причин для их образования всегда достаточно. Так, в первую половину дня 22 июля 1974 г. над озером дул ветер восточного направления со скоростью 4 м/сек. Скорость его быстро возрастила, достигнув к 18 ч. 9 м/сек., что сопровождалось изменением атмосферного давления и явилось причиной возникновения серии сейш с высотой первой волны в 22 см.

Происходящее иногда резкое изменение характера сейшевых колебаний чаще всего имеет своей причиной изменение метеорологической обстановки. На водомерном посту в д. Пески, например, 4 августа 1974 г. были зарегистрированы хорошо выраженные сейши с периодом около 6 час. Между 12 и 15 часами вследствие резкого изменения атмосферного давления (на 2.8 мб) и усиления юго-западного ветра до 8 м/сек. возникла новая серия сейш с периодом уже около 1 часа и высотой волн до 12 см. В результате произошла интерференция волн с разными периодами (рис. 51).

Частой причиной развития сейш на озере являются сгонно-нагонные колебания уровня. Примером может служить нагон воды, наблюдавшийся в Прилуках 25 августа 1974 г.: северо-западный ветер со скоростью до 10 м/сек. нагнал воду в юго-восточную часть озера и на водомерном посту в Прилуках уровень повысился до 28 см. Через 3 часа, когда ветер стал стихать, на лентах самописца уровня четко обозначился ряд сейш с периодом около 6 час. Сгоны и нагоны на оз. Кубенском возникают довольно часто. В табл. 53 приводятся сведения о повторяемости этих явлений на водомерном посту в д. Пески. Величина нагона или сгона определялась как разность между уровнем, предшествовавшим развитию денивеляции, и максимальным его повышением (или понижением). Так как для расчета были использованы данные только двухсрочных наблюдений за уровнем воды, то не учтены денивеляции, продолжавшиеся в течение лишь нескольких часов между сроками наблюдения, а такие имеются, что подтверждается данными самопис-

Т а б л и ц а 53

Количество сгонов и нагонов на оз. Кубенском по годам

Вид денивеляции	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Нагоны	6	6	5	15	24	15	14	5	6	11	6	11
Сгоны	8	13	8	4	10	12	11	7	7	12	17	9
Итого	14	19	13	19	34	27	25	12	13	23	23	20

Т а б л и ц а 54

Распределение денивеляций на оз. Кубенском (в/п Пески) по месяцам в % от средней величины за период 1963-1974 гг.

Месяц	Число денивеляций	Нагоны	Сгоны
У	10.3	3.3	7.0
У1	13.8	6.3	7.5
УII	13.8	7.5	6.3
УIII	12.5	5.5	7.0
1Х	21.4	11.4	10.0
Х	26.0	15.4	10.6
Х1	2.2	1.2	1.0
Среднее за У-Х1	100	50.6	49.4

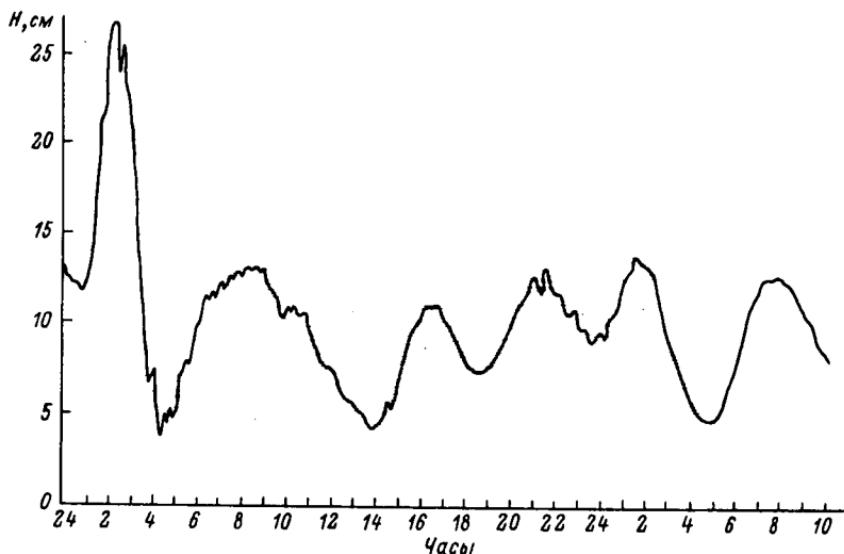


Рис. 51. Лимнограмма на в/п Пески за 4 VIII 1974 г.

цев уровня. Но даже и двухсрочные наблюдения указывают на то, что сгоны и нагоны на оз. Кубенском происходят часто (табл. 53).

В среднем за период 1963-1974 гг. в год (точнее за период открытой воды с мая по ноябрь) наблюдается 21 денивеляция и сгоны и нагоны примерно поровну. В то же время из года в год эта величина меняется от 12 до 34 денивеляций. Еще большая неравномерность в распределении сгонов и нагонов наблюдается в течение сезона (табл. 54). Меньше всего денивеляций бывает в мае, несколько увеличивается их число в июле-августе, но наибольшего развития сгоны и нагоны получают в сентябре-октябре: на эти месяцы приходится почти половина от общего числа за год. Резкое уменьшение количества денивеляций в ноябре объясняется не тем, что в этом месяце уменьшается повторяемость ветров с большой скоростью, вызывающих сгоны и нагоны, а тем, что в ноябре на озере устанавливается ледостав, и часто уже в первой его декаде, который препятствует образованию денивеляций.

В осенние месяцы не только увеличивается количество сгенно-нагонных колебаний уровня, но и значительно возрастает их величина. Если в весенне-летние месяцы года подавляющее большинство денивеляций имеют величину менее 10 см, а выше этого значения отмечаются даже не каждый год, то осенью положение меняется. В сентябре - половина всех денивеляций, а в октябре - 67% их имеют величину уже более 20 см. В эти же осенние месяцы имеют место денивеляции, превышающие 40 и более см. Так, в октябре 1969 г. в Песках нагон воды при северо-восточном ветре со скоростью 18 м/сек. достиг 54 см.

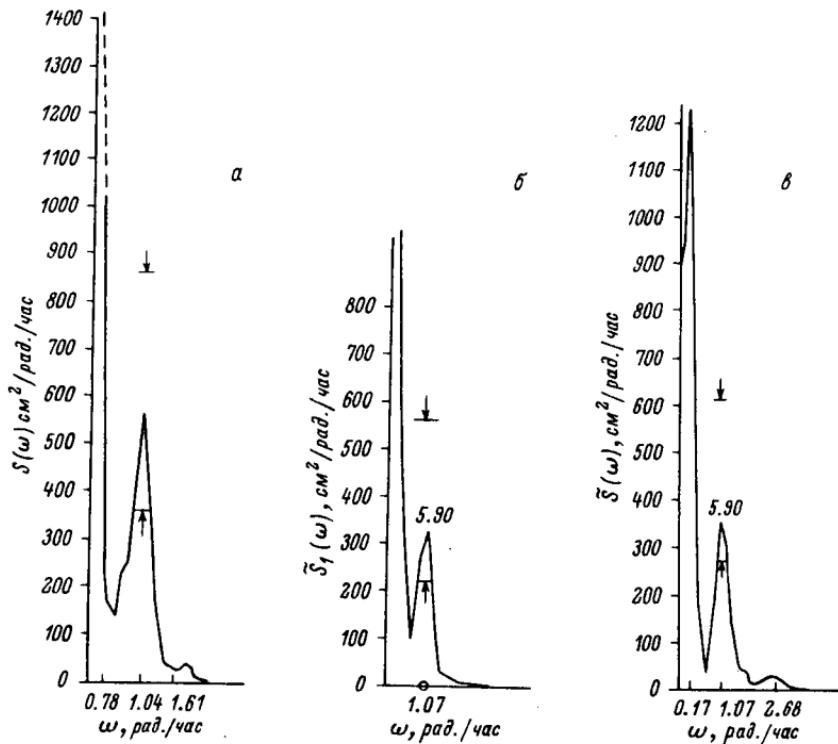


Рис. 52. Спектр флюктуаций колебаний уровня.

а – в/п Пески, длительность реализации 158 час.; б – там же, длительность реализации 9 час.; в – в/п Прилуки, длительность реализации 9 час.

Приведенные выше данные свидетельствуют о значительном распространении на оз. Кубенском сгонно-нагонных колебаний уровня воды, которые в свою очередь являются причиной возникновения сейш.

Для анализа синхронных лимнограмм самописцев, расположенных на противоположных концах озера, был использован метод спектрального анализа. Спектр флюктуаций уровня озера во временных масштабах от нескольких минут до нескольких суток изучен в настоящее время слабо. Однако известно, что существующие в этих масштабах сейшевые, сейшебразные, сгонно-нагонные колебания играют существенную роль в общей изменчивости уровня озер.

В настоящей работе была поставлена задача исследовать спектральную структуру колебаний уровня оз. Кубенского. Для ее решения использованы непрерывные лимнографические записи продолжительностью до 156 час., которые позволили рассмотреть колебания уровня озера во временных масштабах от нескольких минут до 1 суток.

В целях повышения достоверности анализируемых статистических оценок низкочастотные флуктуации с цикличностью более 1 суток были отфильтрованы с помощью скользящего осреднения с дальнейшим полиномиальным выравниванием (Рожков, Трапезников, 1969). Высокочастотные колебания с временными масштабами менее 1 часа исключались фильтром Тьюки. Расчет статистических оценок вероятностных характеристик производился в соответствии с методикой Блекмана – Тьюки по программе корреляционного и спектрального анализов (Мичурин, Казарьян, 1972).

На рис. 52(а, б, в) представлены спектры $\tilde{S}(\omega)$ флуктуаций уровня по водомерным постам Пески и Прилуки, рассчитанные с фильтрацией низкочастотной составляющей и с трендом. Для удовлетворения требований несмещенностии и эффективности оценки $\tilde{S}(\omega)$ рассчитывались при максимальном сдвиге корреляционной функции τ_m , равном 0.1 и 0.2 длины реализации. На рис. 52 (а, б, в) показаны стрелками доверительные пределы $\tilde{S}(\omega)$ при числе степеней свободы $V = 20$.

Анализ спектров $\tilde{S}(\omega)$ показал, что структура колебаний уровня во временных масштабах менее одних суток достаточно проста. Доминирующий вклад (около 90%) вносят колебания с периодами 5.9–6.1 час. Небольшой статистически значимый пик спектральной плотности отмечается на частоте, соответствующей флуктуациям с цикличностью 3 часа; вклад их в общую энергию изменчивости уровня составляет 3–5%. На неотфильтрованных спектрах $\tilde{S}(\omega)$ в/п Прилуки можно также отметить пик спектральной плотности на частоте 0.27 рад./час, которой соответствуют временные масштабы около 1 суток. Вероятнее всего, эти колебания уровня оз. Кубенского вызваны бризовыми ветрами. Колебания уровня с этими же временными масштабами отмечались также на некоторых замкнутых водоемах, например, на озерах Ладожском и Красном, а также Азовском и Каспийском морях (Герман, 1970).

Точно оценить вклад суточных колебаний уровня в общую энергию изменчивости не представляется возможным ввиду ограниченности длины анализируемых реализаций. На неотфильтрованных спектрах $\tilde{S}(\omega)$ хорошо выделяется тренд, связанный с сезонным ходом и колебаниями уровня синоптического масштаба (цикличностью 4–8 суток), однако изучение этих изменений уровня также не проводилось по причине, изложенной выше.

Амплитуда доминирующих колебаний (с периодом $\tau = 6$ час.), вычисленных по спектрам $\tilde{S}(\omega)$ для в/п Пески, составляла 13–17 см, а для в/п Прилуки – 13–14 см; амплитуда колебаний с цикличностью 3 часа равна всего 3–4 см. Взаимный корреляционный анализ колебаний уровня в/п Пески–Прилуки указал на отрицательную взаимную связь колебаний в этих пунктах с максимальным коэффициентом корреляции r_{xy}^* , равным /0.37/. При этом максимум взаимной корреляционной функции (рис. 53) приходится на нулевой сдвиг τ . Относительно невысокий коэффициент взаимной корреляции /0.37/ объясняется наличием в процессе изменчи-

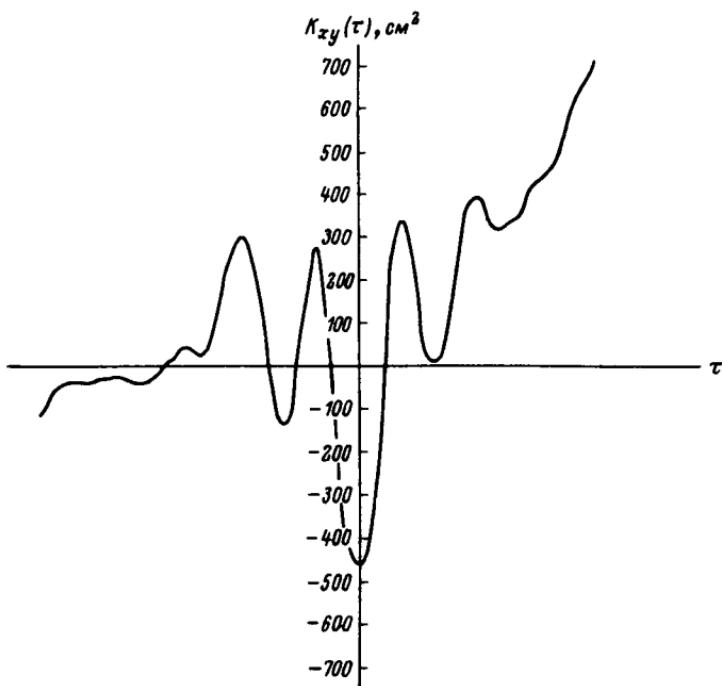


Рис. 53. Ненормированная взаимная корреляционная функция колебания уровня между показаниями водомерных постов Пески и Прилуки.

вости уровня нескольких составляющих. Поэтому целесообразно рассмотреть взаимную статистическую связь колебаний уровня в частотной области с помощью когерентности $F(\omega)$. В результате оказалось, что когерентность между водомерными постами Пески и Прилуки для 6-часовых колебаний составляет 1.0 с разностью фаз $\theta = 179^\circ$, т.е. изменения уровня на противоположных концах озера происходят синхронно, при этом в то время как на одном конце озера наблюдается минимальный уровень, на другом — максимальный. Проделанный выше анализ, выполненный расчет по методу Дефанта, а также наличие реверсивных течений с цикличностью около 6 часов, о которых говорилось выше (разд. 4.2, наст. изд.), подтверждают, что обнаруженные колебания уровня с периодом, близким к 6 часам, вызваны одноузловой продольной сейшой. Одноузловая продольная сейша в оз. Кубенском представляет собой затухающие в течение 3-4 периодов (интервал корреляции $T_K = 15-17$ час) свободные колебания. Возникают сейшевые колебания в результате анемобарических изменений и, в частности, как показали натурные исследования, через 2 часа после прекращения действия ветра со скоростью 7-9 м/сек.

Таким образом, сейшевые колебания оз. Кубенского можно представить как детерминированный процесс со случайной составляющей. Корректное описание таких процессов возможно в рамках представления их как „переходных”, являющих собой один из видов нестационарных процессов (Бендат, Пирсол, 1974). При анализе этих процессов удобно использовать спектральную плотность переходного или импульсного процесса $D^*(\omega)$, основное отличие которой от спектральной плотности, полученной Винером и Хинчным, состоит в том, что при расчете $D^*(\omega)$ не надо использовать деление на T (длину реализации) и дальнейший переход к $T \rightarrow \infty$.

Резюмируя, отметим, что при автоматизированной обработке лимнографических записей можно легко рассчитать характеристики сейш и, получив сведения о спектральной структуре колебаний уровня, оперативно прогнозировать эти колебания.

4.4. Прозрачность воды

Взаимосвязанность оптических свойств воды с продукцированием планктона (Фортунатов, 1959; Мокиевский, 1964; Щербаков, 1967; Румянцев, 1972) позволяет рассматривать их в качестве экологической характеристики водоема, а результаты гидрооптических исследований создают основу для решения ряда научных и прикладных задач, связанных с гидрологией и биологией озер.

Под прозрачностью понимается отношение светового потока, прошедшего в воде путь в 1 м без изменения направления, к световому потоку, вошедшему в воду в виде параллельного пучка. Спектральные величины прозрачности являются безразмерными и изменяются от 0 до 1. Из определения видны существенные различия между физическим показателем прозрачности (θ), измеряемым в различных участках видимого спектра, и относительной прозрачностью (ОП).

Прозрачность воды в фиолетовой части спектра ($\lambda = 420$ нм) позволяет судить о степени окрашенности исследуемой воды растворенными гуминовыми и железистыми соединениями, а в ближайшей красной ($\lambda = 750$ нм) – об относительном содержании взвешенных частиц различного генезиса (Иванов, 1950; Петров, 1967). Пространственно-временная изменчивость содержащихся в воде взвешенных и растворенных окрашивающих органических и минеральных веществ вызывает флуктуации прозрачности в озере. Прозрачность профильтрованной воды в фиолетовом участке спектра нами обозначена как θ_{ff} , а в красном – θ_k . Часто вместо показателя θ_k удобнее использовать характеристику $\Delta\theta_k$, которая определяется как разность между величинами прозрачности в красном участке спектра для фильтрованной и натуральной воды. Прозрачность воды,

Т а б л и ц а 55

Изменение оптических характеристик на ст. 4 в 1972 г.

Дата	Глубина, м	Прозрач- ность по белому диску, м	Оптические характеристики				Мутность, мг/л	t° , С
			θ_{δ}	$\theta_{\Phi\Phi}$	θ_K	$\Delta \theta_K$		
19 III	2.0	-	0.079	0.007	0.278	0.106	2.5	0.03
24 V	4.8	1.0	0.099	0.001	0.398	0.092	1.25	17.2
30 VI	4.5	1.8	0.098	0.023	0.455	0.375	2.5	23.0
5 VII	4.5	1.7	0.143	0.010	0.490	0.030	4.38	24.2
12 VII	4.5	1.8	0.214	0.023	0.590	0.050	2.5	26.5
12 VIII	3.5	1.0	0.073	0.002	0.250	0.170	1.88	19.5
15 VIII	3.5	1.0	0.021	0.006	0.096	0.266	4.38	19.0
10 IX	2.7	0.9	0.026	0.006	0.184	0.020	1.88	16.3
11 IX	2.7	1.2	0.123	0.003	0.366	0.062	1.25	15.2
14 IX	2.0	1.0	0.054	0.004	0.191	0.049	1.25	12.8
23 IX	2.6	0.6	0.043	0.015	0.096	0.134	1.25	8.3

измеренная в полихроматическом свете, обозначается θ_g . Она отражает суммарный эффект влияния взвешенных и растворенных окрашивающих веществ.

Применение мембранных фильтров с диаметром пор 0.9 мк позволяет определить с достаточной точностью величину мутности воды, получаемую в виде сухого остатка взвеси в мг/л. Процесс подготовки и обработки фильтров изложен в работах М.В. Кленовой (1952), А.П. Лисицына (1956).

Инструментальные измерения спектральной прозрачности на пробах воды оз. Кубенского впервые были проведены в 1972 г. Ошибка измерения на модернизированном спектрофотометре Пульфриха не превышала $\pm 2\%$ (Петров, 1967). Были получены также сведения об относительной прозрачности (ОП), измеренной белым диском. Диапазон колебаний ОП, по данным 1972 г., составлял от 0.60 до 2.1 м (табл. 55). В 1972 г. было отобрано и обработано 213 проб воды, позволивших в общих чертах выявить как сезонный ход прозрачности в Кубенском озере, так и распределение ее по акватории и глубинам.

Сезонная изменчивость прозрачности и мутности в 1972 г.

В зимний период (19 марта) на оз. Кубенском при помощи самолета АН-2 было сделано три станции. Глубины на них не превышали 2 м. Пробы отбирались непосредственно подо льдом (табл. 56). Оказалось, что оптические показатели и мутность воды при ледоставе имеют примерно те же характеристики, что и в осенний период.

Лишь только вблизи истока р. Сухоны прозрачность θ_g в осеннее время оказалась несколько больше, чем в северной части озера. В мае же, когда вода прогрелась до 18°, наблюдалась другая картина. В северной части озера, в месте впадения р. Порозовицы, прозрачность была больше, чем в истоке р. Сухоны (табл. 57).

Полученные материалы об изменении оптических свойств воды оз. Кубенского показали следующее. Резкий подъем уровня, вызванный аккумулированием стоковых вод, по всей видимости, способствует тому, что в озере вода частично освещается и поэтому происходит увеличение ОП и спектральной прозрачности. Увеличение прозрачности (табл. 55), начавшееся в мае месяце, заканчивается в первой половине июля. Затем начинается уменьшение прозрачности, и в середине августа она достигает минимальных значений. В дальнейшем прозрачность варьирует незначительно. Таким образом, изменение прозрачности озера в течение года довольно тесно связано с изменением средней глубины озера.

На прозрачность воды оказывают влияние планктонные организмы, и в частности синезеленые водоросли и микроорганизмы.

Т а б л и ц а 56

Оптические характеристики воды оз. Кубенского
при ледоставе 19 III 1972 г.

Станция	Местонахождение станции	Оптические характеристики				Мутность, мг/л
		θ_δ	$\theta_{\Phi\Phi}$	θ_K	$\Delta \theta_K$	
1(5)	Напротив р. Сухоны	0.220	0.018	0.565	0.035	1.88
2(4)	Середина озера	0.079	$7 \cdot 10^{-3}$	0.278	0.106	2.5
3(2)	Северная часть озера	0.112	$1 \cdot 10^{-3}$	0.384	0.046	2.5

Т а б л и ц а 57

Оптические характеристики воды оз. Кубенского
24-28 V 1972 г.

Станция	Оптические характеристики				Прозрачность по белому диску, м	Мутность, мг/л	$t, {}^\circ C$
	θ_δ	$\theta_{\Phi\Phi}$	θ_K	$\Delta \theta_K$			
1	0.21	0.011	0.590	0.075	1.3	1.88	18.7
2	0.10	0.002	0.350	0.130	1.0	3.75	15.0
3	0.11	0.007	0.366	0.274	1.0	1.88	16.0
3 ¹	0.11	0.012	0.398	0.242	1.3	1.88	16.2
4	0.10	0.001	0.398	0.092	1.0	1.25	17.2
5	0.09	$7 \cdot 10^{-4}$	0.384	0.111	1.0	3.13	14.2

Т а б л и ц а 58

Амплитуды изменений прозрачности и мутности
на суточной станции (поверхностный слой – числитель,
придонный – знаменатель)

Время наблюдения	θ_δ	Мутность, мг/л
11-12 VIII	$\frac{0.05-0.11}{0.05-0.15}$	$\frac{2.0-3.7}{2.0-4.4}$
10-11 IX	$\frac{0.03-0.13}{0.03-0.06}$	$\frac{1.25-2.5}{1.25-3.1}$

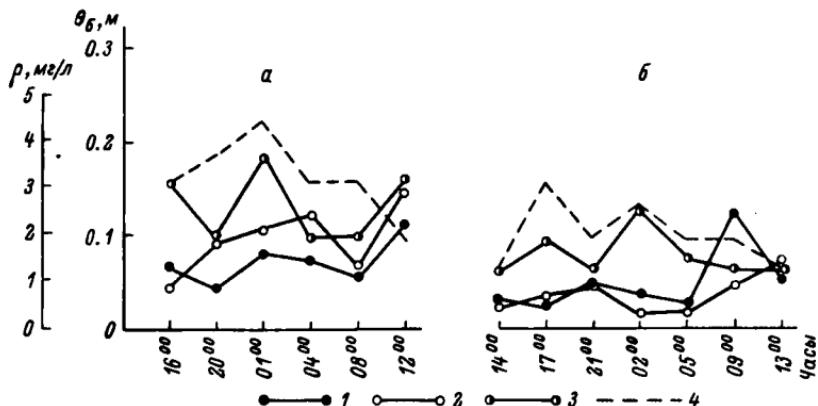


Рис. 54. Изменение прозрачности (θ_δ) и мутности (ρ) на суточной станции (ст. 4).

а - 11-12 VIII 1972, б - 10-11 IX 1972.

Прозрачность (θ_δ): 1 - поверхность, 2 - у дна;
мутность (ρ): 3 - поверхность, 4 - у дна.

По-видимому, рост биомассы синезеленых водорослей в период подъема уровня озера в 1972 г. не соответствовал среднему росту биомассы за этот период. И чем резче поднимается уровень в весенне время, тем заметнее отставание в росте биомассы водорослей, и, как следствие, выше прозрачность воды (табл. 55).

При стабилизации уровня в течение нескольких дней наступила уже другая фаза, когда прозрачность начинает уменьшаться из-за роста численности планктона. Этому способствует интенсивное прогревание всей водной толщи озера. Позднее при дальнейшем падении уровня происходит концентрация планктона в меньшем объеме водной массы озера. Максимум концентрации планктона в 1972 г. проявился в середине августа-начале сентября, т.е. в тот момент, когда прозрачность и уровень воды фактически достигли минимальных значений.

На фоне сезонного хода наблюдались суточные изменения прозрачности. В период 11-12 августа придонная вода, несмотря на большее в ней количество взвесей, оказалась заметно прозрачнее поверхностной. В период 10-11 сентября, наоборот, поверхностная вода была прозрачнее придонной при меньших величинах мутности (табл. 58). Сравнивая данные обеих суточных станций (рис. 54), можно видеть, что только в сентябре наблюдалось некоторое соответствие между прозрачностью и содержанием взвесей.

Объяснить причину несоответствия в августе можно только тем, что в придонном слое преобладали минеральные взвеси, линейные размеры которых превышали 1 мк. В этом случае, основыва-

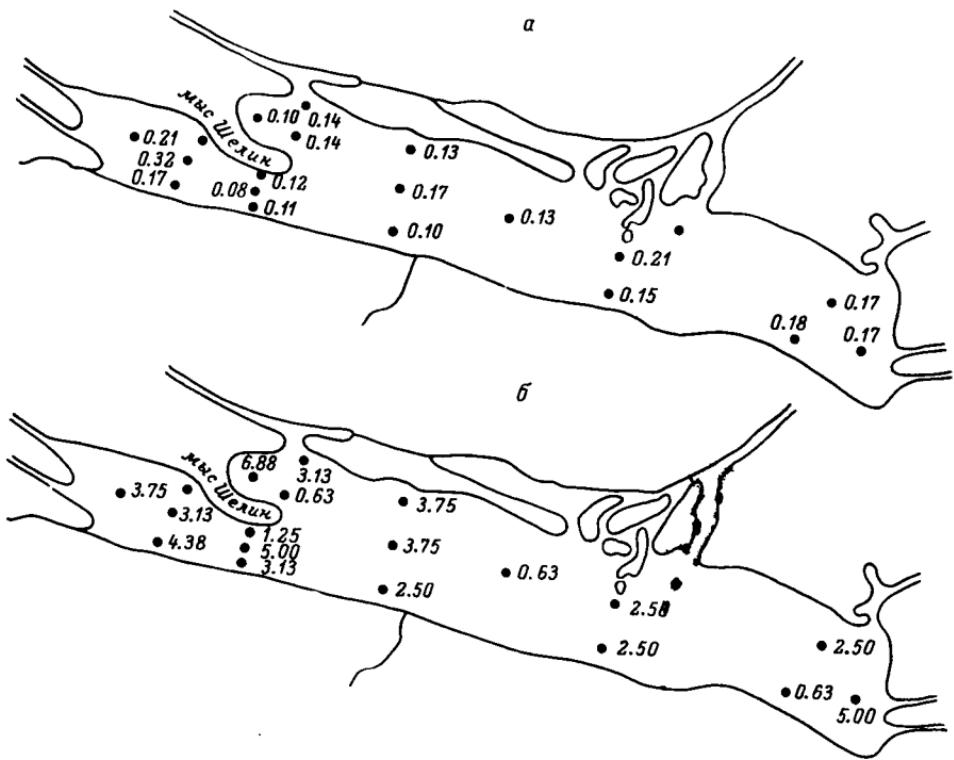


Рис. 55. Распределение прозрачности (а) и мутности (б) на поверхности озера 8 VIII 1972 г.

ясь на экспериментальных исследованиях советских (Шулейкин, 1968; Иванов, 1969) и зарубежных ученых (Барт, 1958 и др.), значительная часть рассеиваемого "крупными" частицами света направлена вперед по ходу излучения. При этом индикатором рассеяния света приобретает остро кинжалную форму и лишь наибольшая часть светового излучения отбрасывается назад или перераспределяется в стороны, не попадая на регистратор. Поэтому присутствие даже большого количества ($5-6 \text{ мг/л}$) "крупных" частиц ($\phi \geq 1 \text{ мк}$), такие преобладают на оз. Кубенском, не влияет на величину регистрируемой прозрачности. Так, например, 8 июля 1972 г. (рис. 55) в районе впадения р. Порозовицы вода оказалась прозрачнее, чем в других частях озера, несмотря на большие величины мутности. В сентябре в процессе выхолаживания водной массы наметилось отмирание планктона и концентрация дестрита и минеральных частиц в придонном слое, что и вызвало здесь уменьшение прозрачности.

Распределение прозрачности и мутности по акватории

По данным 1972 г. удалось установить некоторую закономерность в распределении прозрачности по акватории озера, которая заключается в том, что в водной массе между устьем р. Порозовицы и сужением у мыса Шелин с мая до конца июля наблюдались максимальные для всего озера величины прозрачности – до 2.1 м. Здесь отмечались значения θ_d до 0.40, тогда как по всей остальной акватории за тот же период θ_d редко достигала 0.15–0.20 (рис. 55). Позже, когда уровень озера падает и сильнее сказывается влияние волнения, прозрачность воды повсеместно уменьшается. Начиная с середины августа по сентябрь в 1972 г. прозрачность θ_d распределялась сравнительно равномерно по всей акватории озера и не превышала 0.10. В сужении у мыса Шелин, согласно вышеприведенным данным (разд. 4.2, наст. изд.), наблюдаются наибольшие скорости течений, и вполне естественно, что на этом месте часто удавалось наблюдать максимальные градиенты прозрачности. Например, 23 июля (табл. 59) прозрачность изменилась от 0.20 до 0.07. Значительно изменялась и мутность воды. К середине августа, когда прозрачность достигла минимальных значений ($\theta_d = 0.01 \div 0.10$) и незначительно варьировала по акватории, на этом разрезе можно было отметить тем не менее большие градиенты прозрачности (табл. 59). Таким образом, наличие больших градиентов прозрачности в сужении у мыса Шелин можно считать обычным явлением для безледного периода, что служит косвенным показателем более интенсивных продольных перемещений воды вдоль берегов в этой части озера по сравнению с другими районами.

Наблюдения, проведенные на оз. Кубенском в 1972 г., показали, что физические свойства его водной массы довольно быстро меняют свои характеристики под воздействием волнения. В озере очень слабо выражено расслоение водной массы и мала устойчивость против действия ветров. Ветры оказывают двоякое воздействие: вызывают перемещение воды и одновременно перемешивание всей водной толщи. Такой тип режима с неустойчивым расслоением водной толщи, которая быстро и сравнительно легко перебалтывается от поверхности до дна, можно назвать астатическим (Фортунатов, 1959). Приводимые данные по оптике и мутности со своей стороны достаточно полно иллюстрируют астатический режим озера.

Т а б л и ц а 59

Распределение прозрачности и мутности на разрезе в сужении у мыса Шелин

Дата	Станция	θ_f	$\theta_{\text{ФФ}}$	$\Delta \theta_K$	Мутность, мг/л	Прозрачность по белому диску, м	t, °C	Биомасса, мг/л
24 VI	26	-	-	-	-	-		
	2	0.102	0.002	0.13	3.75	1.0	15.0	-
	2a	-	-	-	-	-		
28 VI	26	-	-	-	-	-		
	2	0.166	0.011	0.04	3.13	2.0	24.0	-
	2a	0.180	0.012	0.140	1.25	2.1	23.5	-
6 VII	26	0.127	0.030	0.185	3.75	1.2	26.0	-
	2	0.077	0.010	0.035	2.5	1.8	24.0	-
	2a	0.062	0.029	0.297	3.75	1.3	24.5	-
12 VII	26	0.119	0.009	0.215	1.25	1.8	27.6	1.029
	2	0.078	0.026	0.152	2.0	1.9	27.2	0.576
	2a	0.111	0.030	0.075	3.13	1.9	27.3	0.633
23 VII	26	0.203	0.004	0.085	3.75	1.0	20.0	-
	2	0.117	0.001	0.060	2.5	1.1	20.5	-
	2a	0.071	0.002	0.284	3.13	1.0	19.5	-
14 VIII	26	0.038	0.007	0.093	4.38	0.8	20.0	-
	2	0.003	0.0001	0.071	5.63	0.8	19.5	-
	2a	0.088	0.023	0.158	3.75	0.7	19.6	-
13 IX	26	0.080	0.008	0.084	5.63	1.0	13.7	-
	2	0.034	0.003	0.071	1.25	1.0	13.5	-
	2a	0.018	0.004	0.096	3.13	0.9	13.8	-

В практике гидрологических работ электропроводность, как наиболее консервативный элемент, используется в качестве показателя водных масс. Измерения электропроводности воды в течение двух полевых сезонов (1973–1974 гг.) на оз. Кубенском проводились с целью определения зоны распространения воды притоков в озере.

Вода благодаря присутствию растворенных минеральных солей, кислот и оснований является хорошим проводником электричества – электролитом. Электропроводность природных вод обусловлена ионами Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Ионы Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , NO_3^- , NO_2^- незначительно влияют на электропроводность (Воробьев, 1963). Поскольку электролиты диссоциируют по-разному, то электропроводность природных вод зависит не только от общей минерализации, но и от соотношения содержания солей. Так как подвижность ионов зависит от температуры раствора, то и электропроводность зависит от нее, изменяясь примерно на 2% при ее изменении на 1° (Воробьев, 1963).

Величина электропроводности воды озера может меняться под воздействием биологических процессов, связанных с жизнедеятельностью организмов. Н.И. Воробьев (1963) ссылается на работы Института гидробиологии АН УССР, в которых показано, что процессы фотосинтеза, смещающие карбонатное равновесие, сказываются на уменьшении значений электропроводности, а процессы разложения органического вещества (разложение отмерших планктонных организмов) приводят к повышению электропроводности. В практике водных исследований определяется удельная электропроводность воды, которая представляет собой количество электричества, проходящего в 1 сек. через сечение, перпендикулярное силовым линиям поля и равное 1 см², при градиенте потенциала в 1 в/см. Удельная электропроводность (σ) есть величина, обратная удельному сопротивлению ($\rho = \frac{1}{\sigma}$), и представляет собой электропроводность 1 см³ раствора (Вольф и др., 1971). Единица измерения удельной электропроводности – сименс/см (сим./см) или микросименс/см (мксим./см), который равен $1 \cdot 10^{-6}$ сим./см. Наименование „сименс“ дано в честь немецкого ученого Э.В. Сименса. В дальнейшем под электропроводностью будем подразумевать удельную электропроводность.

Работа по определению электропроводности воды проводилась с мая по сентябрь в 1973–1974 гг. на участках озера в зоне впадения притоков и по всему озеру. Наблюдения велись методом съемок по стандартной сетке станций путем измерения „in situ“ и методом отбора проб, которые отбирались батометром Рутнера. Измерения проводились на двух горизонтах. Непосредственное измерение электропроводности воды в озере проводилось с помощью специально сконструированного датчика, в основу которого были

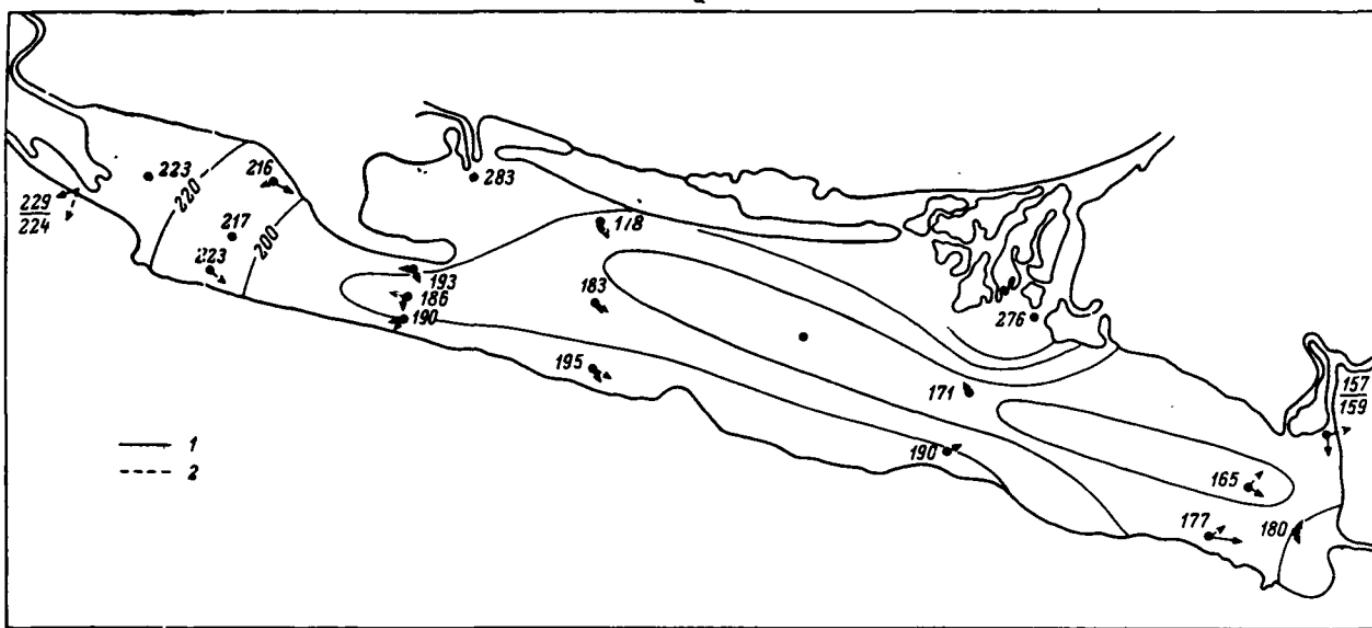


Рис. 56. Распределение электропроводности воды по акватории озера.

а - 23-25 VI 1973 г. (ветер СС3, ССВ); 1 - направление поверхностного течения; 2 - направление придонного течения.

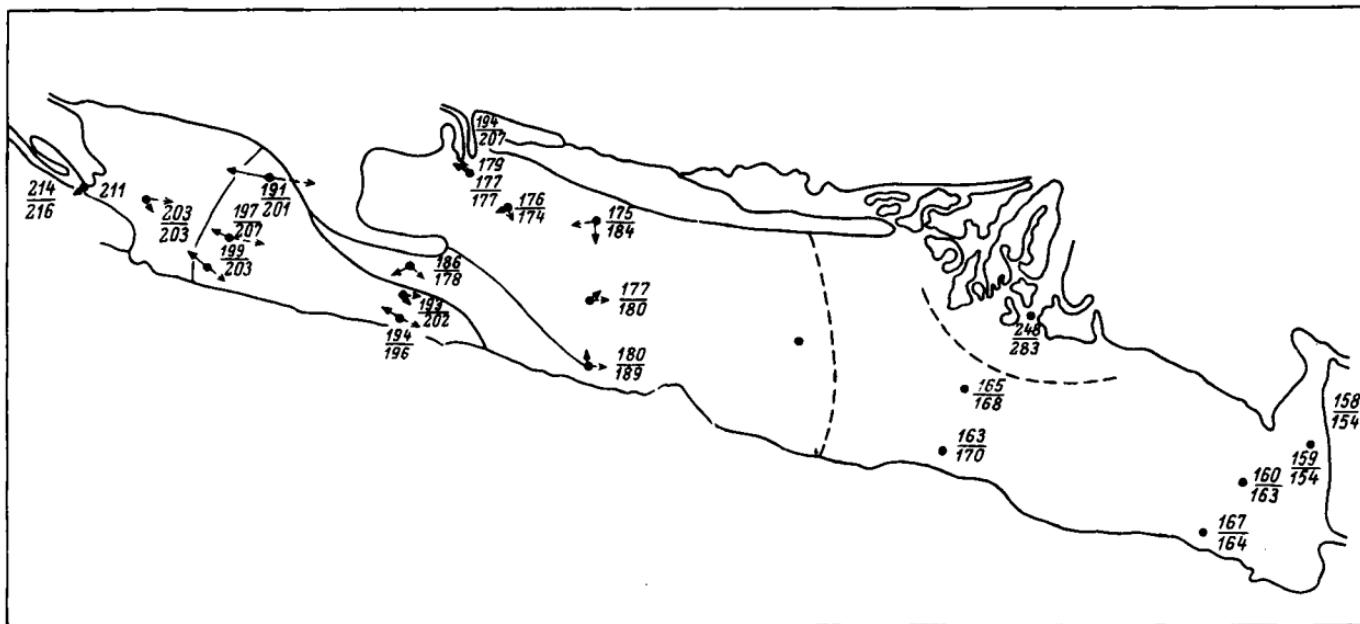
δ 

Рис. 56. (продолжение).

6 - 20-22 VI 1974 г. (ветер ЮВ).

8

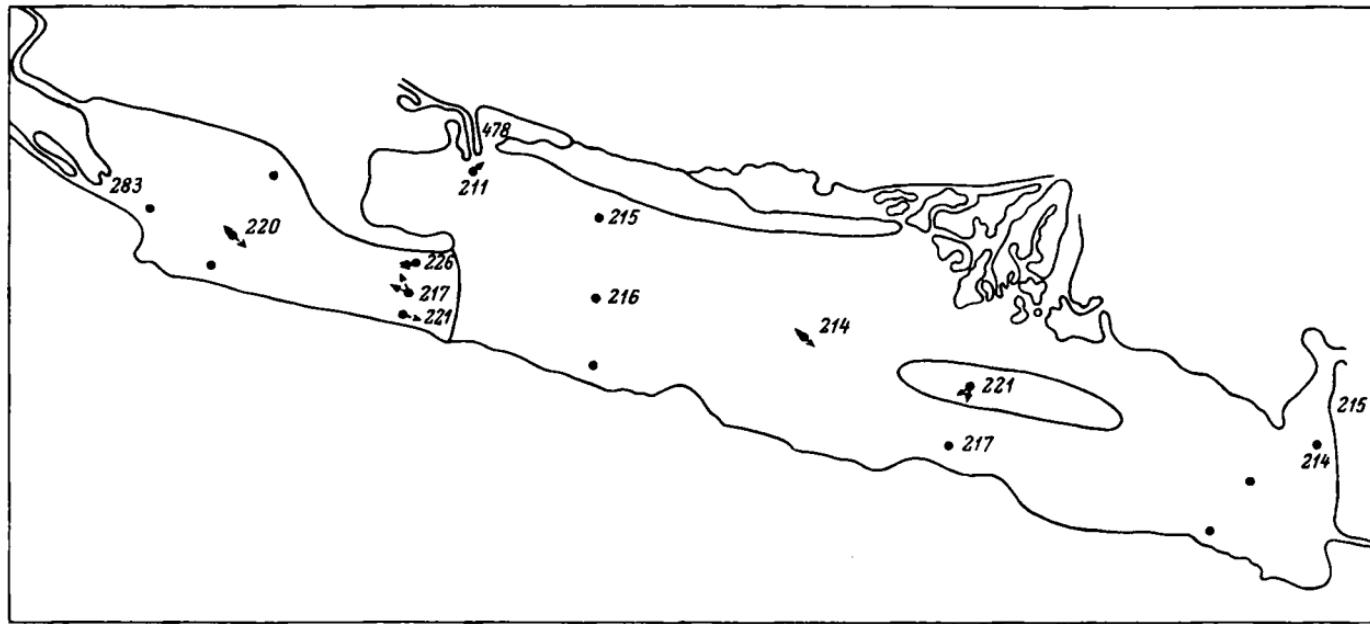


Рис. 56 (продолжение).

в - 11-13 IX 1973 г. (ветер ЮВ).

положены платиновые электроды (нечерные) от стандартного кондуктометра ММЧЗ-64. Отсчеты делались по мосту Р-38, питание которого осуществлялось от батарей (9 в) через преобразователь на переменном токе с частотой 1000 гц. Одновременно с электропроводностью измерялась температура воды с помощью датчика на основе терморезистора ММТ-6 с номиналом 5 ком, смонтированного на том же кабеле. Пробы воды обрабатывались на берегу с помощью реохордного моста в комплекте с электролитической ячейкой. Температурный датчик тарировался до начала полевых работ и по окончании их в сосуде Дьюара. Определение постоянной (каппацитета) датчика электропроводности и ячейки проводилось неоднократно в полевых условиях по методу Долгова (Долгов, 1954). Все полученные значения электропроводности приведены к температуре 18° с пересчетом по таблице Долгова.

Чтобы получить правильную картину распространения вод притоков, нужно знать величины электропроводности воды самого озера, их распределение по площади и изменение во времени.

Анализ полученных данных позволил установить, что по характеру распределения значений электропроводности, который сохраняется в течение всего периода наблюдений, озеро делится на 3 района: северо-западная часть – до 2-го разреза, центральная часть – от 2-го до 4-го разреза и юго-восточная часть – 4-5 разрез (рис. 56, а, б, в). Такое распределение довольно устойчиво и сохраняется после действия ветра.

Наибольшими показателями электропроводности характеризуется северо-западная часть, где ее значения изменяются от 210 мксим./см в июне до 232 мксим./см в августе–сентябре 1973 г. Наименьшие значения наблюдались в юго-восточной части, где электропроводность составляла от 165 до 214 мксим./см в течение сезона. Причиной повышенных значений электропроводности в северо-западной части является увеличение минерализации воды, вызванное неглубоким залеганием коренных осадочных пород (местами 8–10 м). Реки, стекающие с северо-западного побережья, несмотря на их незначительную протяженность, отличаются повышенной минерализацией с преобладанием сульфатов. В центральной части озера значения электропроводности являются переходными между ее значениями в северо-западной и юго-восточной частях озера.

В отдельные годы весной при высоких уровнях выделяется район, прилегающий к р. Уфтуге, который характеризуется более низкими значениями электропроводности по сравнению с озерными. В июне 1974 г., когда уровень был на 1 м выше, чем в 1973, электропроводность в этой части озера составляла 160 мксим./см, т.е. столько же, сколько и в реке, а на ст. 3 она достигала 175 мксим./см.

Электропроводность имеет хорошо выраженный сезонный ход, вызываемый изменением общей минерализации. Весной, в половодье, наблюдались наиболее низкие значения электропроводности

(80 мксим./см в мае 1974 г.), которые в течение лета постоянно увеличивались (226 мксим./см в сентябре 1973 г.), о чем свидетельствуют приведенные ниже крайние значения электропроводности в летние месяцы за два года.

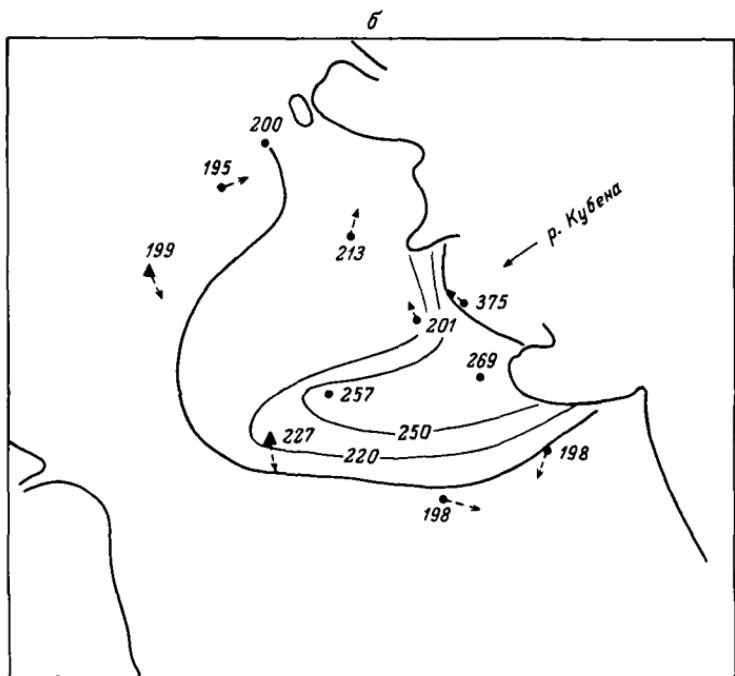
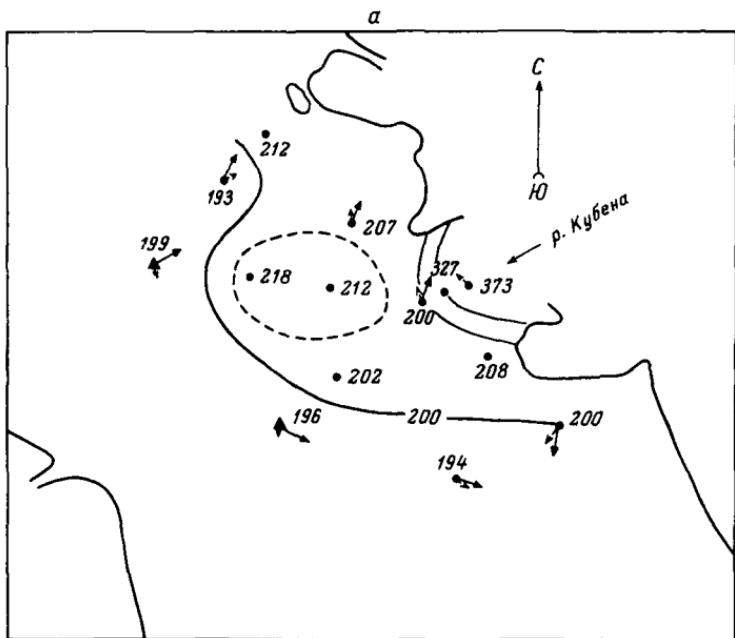
1973 г. 1974 г.

V	-	80
VI	165-223	140-199
VII	185-223	160-207
VIII	197-232	-
IX	214-226	-

Как показывают эти данные, в течение летнего сезона на фоне общего увеличения бывает наблюдается сглаживание, выравнивание значений электропроводности по акватории озера, которое происходит за счет увеличения их значений в центральной и юго-восточной части озера. Если в июне 1973 г. крайние значения электропроводности по озеру составляли 165 мксим./см в юго-восточной и 223 мксим./см в северо-западной частях, то в сентябре для этих же районов они составили 214 и 226 мксим./см.

Это происходит потому, что весной после таяния льда и вскрытия рек в озере накапливаются воды с низкими значениями электропроводности. По данным съемки, проведенной в мае 1974 г., воды с электропроводностью 80 мксим./см отмечались в районе от о. Каменного до р. Сухоны (остальная часть озера не была охвачена наблюдениями из-за ледостава в этих районах). Так как сток р. Кубены в половодье составляет около 80% годового, то кубенская вода надолго остается в озере (коэффициент условного водообмена озера равен 4.0), трансформируется и постоянно разбавляется в течение лета все более минерализованными водами реки. На рис. 56, в, где показано распределение электропроводности в сентябре 1973 г., видно, что ее значения однообразны почти по всему озеру (214-216 мксим./см), кроме его северо-западной части (220, 226 мксим./см). Величины электропроводности в этом районе несколько ниже, чем они были в августе. Вероятно, в результате сгонно-нагонных явлений, вызванных предшествующим штормовым ветром, сюда проникли воды основного плёса.

В одни и те же месяцы электропроводность не остается постоянной из года в год: ее значения зависят от высоты стояния уровня в озере. Так, в июне 1973 г. бывает равна 165-223 мксим./см, а в июне-1974 - 140-199 мксим./см при уровне соответственно 110, 29 и 111.26 м. Изменение электропроводности по вертикали в юго-восточной и центральной частях озера незначительно (до 9 мксим./см в июле 1974 г.), в северо-западной части оно увеличивается (4-21 мксим./см, август 1973). Эти различия мо-



гут быть вызваны биологическими процессами, о чем говорилось выше, или притоком грунтовых минерализованных вод.

Река Кубена – самая крупная река озера, средний многолетний расход которой составляет $100 \text{ м}^3/\text{сек.}$, а объем стока – 3.2 км^3 при объеме озера 1.02 км^3 . Паводочные расходы достигают более $1000 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Кубена впадает в озеро 15 рукавами, образуя в устье множество островов и мелей. В связи с падением уровня воды в реке в течение лета значения электропроводности речных вод изменялись от 80 (май 1974 г.) до 474 мксим./см (сентябрь 1973 г.).

Наблюдения проводились при различных направлениях ветра и в штилевую погоду. Ветер играет существенную роль в распределении кубенских масс воды, но при одинаковом направлении ветра нет полного сходства в распределении электропроводности, так как распространение речного потока в озере зависит от объема смешиваемых вод, скорости их течения, морфологии дна, предшествующей ветровой обстановки, глубин на рассматриваемом участке озера. Последнее обстоятельство особенно важно для оз. Кубенского, так как его уровень очень заметно падает в летний период.

При штиле воды р. Кубены, растекаясь в озеро, распространяются до самого фарватера и хорошо прослеживаются на поверхности и у дна (рис. 57, а, б). Наиболее четко речные воды выражены у дна, где наблюдаются более высокие значения электропроводности, чем на поверхности. Основной поток распространяется вдоль берега в сторону р. Сухоны, что видно по значениям электропроводности. При низком стоянии уровня в озере кубенские воды, минуя прибрежное мелководье, устремляются сначала к фарватеру, а потом в сторону р. Сухоны, что подтверждается направлением течений на рис. 57, б. На устьевой станции придонное течение направлено в сторону о. Каменного, но значения электропроводности здесь ниже, чем вдоль сухонского берега.

При северо-восточном ветре, который для р. Кубены является сгонным, речные воды распространяются до фарватера, хорошо проявляясь на поверхности и у дна. Изолинии электропроводности показывают, что воды реки, смешанные ветром к юго-западу, усиливают течение в Сухону. Поверхностное течение совпадает с направлением ветра, скорость которого во время съемки составляла $3-5 \text{ м/сек.}$ Различий электропроводности по вертикали нет (рис. 58, а, б). При нагонном западном ветре речные воды недалеко проникают в озеро (рис. 59), они прижимаются к берегу, основным потоком устремляясь в сторону р. Сухоны. Поверхностное течение направлено из реки на северо-запад в сторону о. Каменного, где электропроводность ниже, чем в реке. При юго-восточном вет-

Рис. 57. Распространение вод р. Кубены в поверхностном (а) и придонном (б) слоях озера в штиль 2 VIII 1973 г.

Обозначения те же, что и на рис. 56.

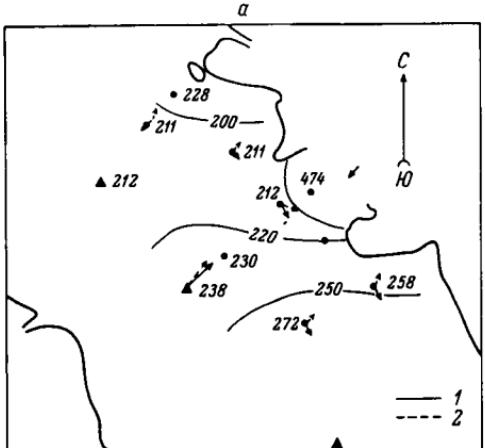
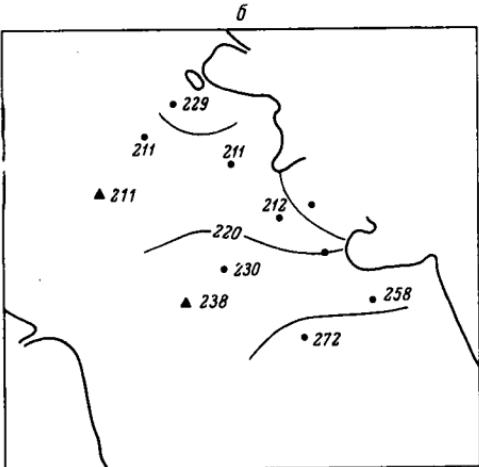


Рис. 58. Распространение вод р. Кубены в поверхностном (а) и придонном (б) слоях озера при СВ ветре 4 IX 1973 г.

Обозначения те же, что и на рис. 56.

ре происходит нагон вод из южной части озера, что отражено в направлении течений, а кубенские воды направлены вдоль берега к Сухоне против ветра.

Таким образом, на движение кубенских вод значительное влияние оказывает ветер. При штиле и сгонном ветре воды р. Кубены распространяются до фарватера, т.е. на 4 км от устья. При сгонных ветрах не отмечено речных вод в направлении к фарватеру. Существование потоков речных вод вдоль берега в направлении к р. Сухоне и о. Каменному наблюдается при различных ветровых условиях, но характер их распространения зависит от направления и скорости ветра и глубины в озере. Различий значений электропроводности по вертикали в



условиях ветра не наблюдалось. При штиле различия выражены хорошо, наибольшие значения отмечаются у дна, иными словами, речные воды, попадая в озеро, как бы „ныряют” в озерную воду.

Река Уфтуга является вторым по объему стока притоком озера. Средний многолетний объем ее стока составляет 0.370 км^3 , или 36% объема озера. В месте впадения реки озеро мелкое, особенно в летне-осенний период, дно песчаное, изобилует камнями. Предустьевой участок в июле-августе зарастает камышом и воды Уфтуги распластываются по этим зарослям. В условиях штилевой погоды наблюдения проведены в 1973 и 1974 гг. при разнице в отметках уровня 1.3 м. В июле 1974 г. (4 УП 1974) речные воды в озере не прослеживаются. Электропроводность воды на станциях в реке – 187 мксим./см, а на озерных, на всем исследуемом участке, – 165 мксим./см (рис. 60). Воды р. Уфтуги проходят вдоль северо-восточного берега озера. Вероятно, в озере сохранились паводочные воды, так как уровень озера по сравнению

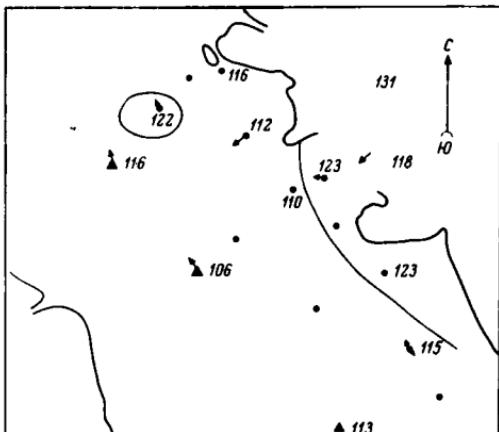


Рис. 59. Распространение вод р. Кубены в поверхностном слое озера при западном ветре 11 V 1974 г.

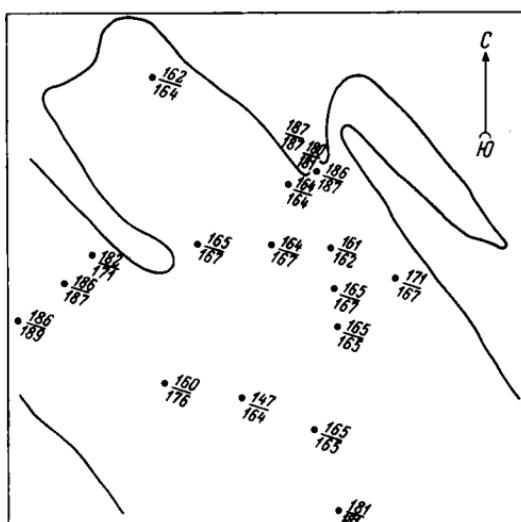


Рис. 60. Распространение вод р. Уфтуги в озере в штиль 4 VII 1974 г.

Обозначения те же, что и на рис. 56.

с майским упал всего на 54 см, а электропроводность воды в этом районе озера 20 июня 1974 г. составляла тоже 165 мксим./см.

В августе 1973 г. воды р. Уфтуги отмечались в придонных горизонтах на расстоянии 2 км от устья со значениями электропроводности, равными 227, 218 мксим./см при 240, 290 мксим./см в реке, т.е. речные воды в безветренную погоду "ныряют" в озеро. На поверхности на этих же станциях была озерная вода.

При сгонном северо-восточном ветре (13 VII 1973) значения электропроводности быстро падают с 350 мксим./см в реке до 203 мксим./см на выходе из реки в озеро на поверхности и 234 мксим./см у дна. На расстоянии 2 км от устья речные воды слабо прослеживаются лишь у северо-восточного берега озера. Различий значений электропроводности по вертикали на озерных станциях не отмечалось.

При нагонном юго-западном ветре (9 VI 1973) скорость поверхности течения на станции в реке равна 0. На озерных станциях, кроме одной, где на поверхности фиксировались воды с повышенными значениями электропроводности, речных вод не наблюдалось. Таким образом, воды р. Уфтуги распространяются на расстояние 2 км.

Река Порозовица по объему стока составляет пятую часть объема озера; ее средний многолетний расход – 7 м³/сек. По значениям электропроводности воды реки незначительно отличаются от вод северо-западной части озера. Разница значений возрастает весной и осенью. Весной электропроводность в реке ниже, чем в озере, осенью, наоборот, в реке выше, чем в озере. Подробных съемок в эти периоды не было. Летом проследить влияние р. Порозовицы не удалось. В 1973 г. дважды проводились определения электропроводности в 10-12 км выше по течению реки. Значения электропроводности в реке оказались ниже ее значений в устье. В июле в реке было равнялось 206, в устье – 236 мксим./см; в августе: в реке – 206, в устье – 234 мксим./см. Река находится в подпоре от озера. Может быть, поэтому воды реки по электропроводности мало отличаются от озерных.

Из всех притоков наиболее ощутимое влияние на озеро оказывает р. Кубена, значительно меньше – р. Уфтуга. Характер распространения речных вод зависит от водности реки, глубины в озере, скорости и направления ветра и пр.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ И БАЛАНС оз. КУБЕНСКОГО

5.1. Радиационный баланс и проникающая радиация

Задача настоящей работы – расчет радиационного баланса оз. Кубенского для периода открытой воды (май–октябрь) за 1951–1973 гг. Полевые актинометрические исследования состояли в стационарных (рис. 2, точка I) и эпизодических (рис. 2, точки II–IV) наблюдениях по акватории озера. При стационарных наблюдениях, проводившихся в 1972 (10 VIII–10 IX) и 1973 гг. (15 VI–8 IX), актинометрические приборы устанавливались на выносной стреле с носа судна, стоящего на якоре. Высота приемной поверхности приборов над водой составляла 1.5 м, длина выноса – 3 м. Глубина озера в месте стоянки судна в течение сезона менялась от 3.6 до 2.5 м. В дневное время измерялась проникающая радиация на глубинах 0.1, 0.25, 0.5 и далее через каждые 0.5 м. Для этой цели использовался термоэлектрический подводный пиранометр, изготовленный в мастерских ГГО, в остальных наблюдениях – стандартные актинометрические приборы. Эпизодические наблюдения (VIII 1973 г. и VII–VIII 1974 г.) проводились по той же программе, что и стационарные, через каждые 2–3° изменения высоты солнца в светлое время суток в течение 8–10 дней в каждой точке. Всего за три полевых сезона было проведено 654 серии измерений составляющих радиационного баланса и 583 серии измерений проникающей радиации.

Результаты, полученные за время полевых наблюдений, изложены в первом разделе работы. Второй посвящен расчету радиационного баланса озера Кубенского за многолетний период. Для характеристики окружающей территории использованы метеорологические данные по станциям Коробово, Вологда¹ (Молочное и Семенково), Тотьма, Чарозеро, Каргополь. Данные актинометрических наблюдений с многолетним рядом (1955–1974 гг.) имеются лишь по ст. Каргополь, шестилетним (1953–1958 гг.) – по ст. Вологда–Молочное, данные по суммарной радиации и радиационному балансу начиная с 1969 г. – по ст. Вологда–Семенково, по продолжительности солнечного сияния начиная с 1916 г. – по ст. Каргополь, с 1956 г. – Тотьма, с 1955 по 1969 г. – Вологда–Молочное и с 1969 по 1974 г. – Вологда–Семенково. Расстояние между станциями Коробово и Каргополь составляет 2° широты, между Коробово и Чарозеро – 1°.

¹ Расстояние между станциями Вологда–Молочное и Вологда–Семенково – 15 км.

Радиационный режим за полевой период
(1972-1974 гг.)

Преобладание циркуляции типа Е в течение теплого периода 1972-1974 гг. привело к тому, что на всей территории, занятой озерами Кубенским, Воже и Лача, облачность была значительно ниже средних многолетних величин (табл. 60). Значительные положительные отклонения общей облачности (до 2 баллов) наблюдались лишь в мае 1974 г. как результат значительного участия циркуляции типа W. Некоторое повышение облачности (особенно нижней) отмечается в августе 1974 г. Характер суточного хода общей облачности отличается плавностью с небольшими максимумом в околополуденные часы и минимумом ночью (амплитуда 2-3 балла), чего нельзя сказать о ходе нижней: вочные часы она уменьшается почти до нуля, но достигает максимальных величин в послеполуденные часы (амплитуда до 5 баллов). Последнее обстоятельство подчеркивает характерную особенность развития облачности при циркуляции типа Е - образование конвективных кучевообразных облаков, связанных со значительным радиационным притоком тепла к подстилающей поверхности. Август 1972 г. выделяется почти полным отсутствием выраженного суточного хода облачности на всех станциях, кроме Каргополя. Объясняется это тем, что дымная мгла, граница распространения которой проходила севернее Чарозера и Тотьмы (и не захватывала Каргополь), препятствовала как интенсивному испарению, так и возникновению конвективных потоков и образованию облачности. В течение августа 1972 г. на ст. Коробово зарегистрировано 20 дней с дымной мглой.

Рис. 61 позволяет сравнить дневной ход облачности по данным актинометрического поста на озере (рис. 2, точка I) и метеостанции Коробово, расположенной на расстоянии 1 км от берега Кубенского озера и в 15 км от поста. Максимальное расхождение в отдельные сроки достигает 0.4-0.5 баллов, что находится в пределах точности определения облачности. В среднем за месяц значения облачности (в баллах) по этим пунктам следующие:

июль 1973 г. Коробово - 4.8/2.6, озеро - 5.0/2.8
август 1973 г. Коробово - 5.9/3.7, озеро - 5.8/3.6.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что наблюдения за облачностью на метеостанции Коробово можно считать отражающими реальные условия облачности над озером и в дальнейшем использовать их в расчетах составляющих радиационного баланса за многолетний период. Месячные характеристики облачности хорошо согласуются с величинами суммарной радиации за 1972-1974 гг. (табл. 61).

Актинометрические наблюдения на оз. Кубенском относятся в основном к периоду максимального нагревания - июлю-августу (табл. 62). В радиационном балансе водной поверхности определя-

Таблица 60

Отклонения облачности (в баллах) в годы работы экспедиции от средних ее значений за многолетний период (1950-1974 гг.)

Станция	V		VI		VII		VIII		IX		X	
	общ.	нижн.										
1972 г.												
Коробово	-0.4	-0.7	-0.8	-1.3	-1.6	-1.2	-2.2	-1.9	-0.5	-1.0	0.5	0.0
Вологда	-0.3	-0.3	-0.4	-1.0	-1.3	-1.5	-1.6	-1.5	0.4	-0.3	0.3	0.4
Тотьма	-0.4	-0.2	-1.0	-1.0	-2.5	-1.7	-2.3	-2.7	-0.5	-1.6	0.2	0.3
Чарозеро	-0.7	-1.9	-1.0	-1.2	-1.5	-1.8	-1.9	-2.5	-0.6	-1.4	-0.1	-0.8
Каргополь	0.0	0.1	-0.3	0.6	-0.3	-0.2	-0.2	-0.9	-0.3	0.4	0.3	1.1
1973 г.												
Коробово	-1.6	-1.0	-0.3	-0.5	-1.4	-1.1	-0.5	-0.1	0.5	0.8	-0.4	-0.1
Вологда	-1.3	-0.8	-0.2	-0.4	-0.6	-0.4	0.0	0.3	0.9	1.4	0.1	0.4
Тотьма	-1.5	-1.0	-0.4	-0.6	-0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1	0.3
Чарозеро	-1.5	-1.2	-0.3	-1.2	-2.1	-2.1	-0.6	-1.4	0.0	-1.0	-0.4	-1.9
Каргополь	-1.2	-0.2	0.3	-0.1	-2.0	-1.4	-0.5	0.0	-0.3	0.3	0.5	0.8
1974 г.												
Коробово	0.9	0.7	-0.6	-0.8	-0.1	-0.4	0.3	0.5	-1.6	-2.0	0.1	-0.2
Вологда	1.7	1.9	-0.1	-0.7	0.3	0.3	0.8	1.2	-1.3	-1.8	0.6	0.1
Тотьма	2.4	1.3	-0.7	0.3	-1.0	-0.9	0.5	1.1	-1.6	-1.6	0.0	0.0
Чарозеро	0.4	-0.5	-0.8	-1.3	-0.3	-0.6	0.8	0.4	-1.5	-2.3	0.2	-1.2
Каргополь	0.4	0.9	-0.1	-0.2	0.1	-1.5	0.7	1.5	-1.0	-1.2	0.0	0.3

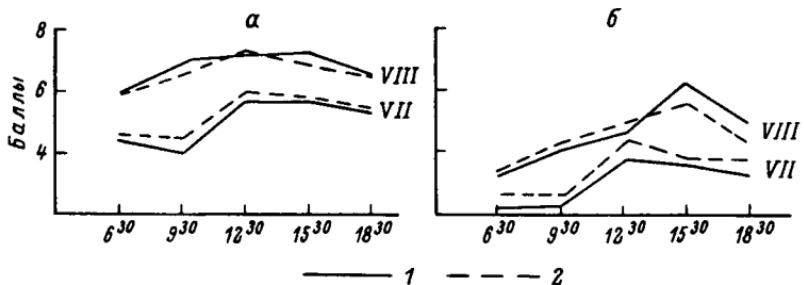


Рис. 61. Суточный ход общей (а) и нижней (б) облачности (1973 г.) на ст. Коробово (1) и актинометрическом посту озера (2).

Т а б л и ц а 61

Суммарная радиация (в ккал./см². мес.)
по показаниям ст. Каргополь

Год	V	VI	VII	VIII	IX	X	V-X
1972	12.3	14.2	15.1	9.9	4.2	1.5	57.2
1973	13.2	13.4	15.6	9.5	3.9	1.9	57.5
1974	10.6	15.4	14.6	6.8	6.2	2.2	55.8
Средняя много- летняя (1950- 1974)	11.4	13.2	12.7	8.8	4.3	1.8	52.2

ющей является поглощенная радиация, но поскольку величина альбедо для водоемов невелика (сезонные изменения 7-13%), значения поглощенной и суммарной радиации очень близки. Изменчивость дневных величин радиационного баланса определяется в основном изменениями в приходе суммарной радиации. Межсуточная изменчивость суммарной радиации и радиационного баланса в 4-5 раз превышает межгодовую. Максимальная амплитуда между суточными суммами Q в июле составляет 550 ккал./см², в августе - 450 ккал./см². Амплитуда суточных сумм радиационного баланса в июле равна 470 ккал./см², в августе - 350 ккал./см². Межгодовая изменчивость величин альбедо невелика - 1-1.5%.

Суммарная радиация на больших озерах и водохранилищах, как правило, несколько выше, чем в прилежащих к водоему районах

Т а б л и ц а 62

Элементы радиационного баланса по наблюдениям на озере
 (месячная сумма - ккал./см², среднее суточное - кал./см²)

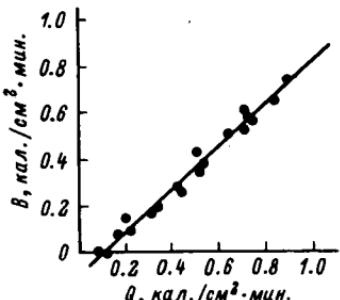
Элемент	1972 г.		1973 г.				1974 г.			
	VIII (20 дн.)	VI (10 дн.)	VII		VIII		VI (16 дн.)	VII		VIII (23 дн.)
	ср. сут.	ср. сут.	ср. сут.	Σ мес.	ср. сут.	Σ мес.	ср. сут.	ср. сут.	Σ мес.	ср. сут.
Q	331.7	601.5	497.9	15.4	354.8	11.0	585.2	450.0	14.0	350.5
D	156.5	189.4	171.2	5.3	182.6	5.7	206.2	206.5	6.4	170.8
S'	175.1	412.1	326.7	10.1	172.3	5.3	379.0	243.5	7.6	179.7
R	30.2	46.4	38.6	1.2	33.4	1.0	-	35.5	1.1	-
B _K	301.5	555.1	459.3	14.2	321.4	10.0	-	-	-	-
B	201.2	428.6	352.1	10.9	237.3	7.4	-	-	-	-
E _{эфф}	100.3	118.8	107.2	3.3	83.1	2.6	-	-	-	-
A, %	8.5	7.7	7.8	7.8	9.4	9.4	-	7.6	7.6	9.5

Т а б л и ц а 63

Дневной ход суммарной (Q), прямой (S')
и рассеянной (D) радиации (в кал./см².мин.) на озере

	6 ³⁰	9 ³⁰	12 ³⁰	15 ³⁰	18 ³⁰
И ю л ь					
1973 г.					
Q	0.34	0.74	0.85	0.65	0.19
S'	0.20	0.52	0.60	0.41	0.08
D	0.14	0.22	0.25	0.24	0.11
1974 г.					
Q	0.28	0.66	0.76	0.61	0.17
S'	0.13	0.38	0.44	0.34	0.06
D	0.15	0.28	0.32	0.27	0.11
А в г у с т					
1972 г.					
Q	0.20	0.51	0.72	0.42	0.09
S'	0.11	0.28	0.43	0.21	0.02
D	0.09	0.23	0.29	0.21	0.07
1973 г.					
Q	0.22	0.53	0.71	0.52	0.11
S'	0.10	0.26	0.34	0.26	0.03
D	0.12	0.27	0.37	0.26	0.08
1974 г.					
Q	0.19	0.52	0.66	0.50	0.10
S'	0.09	0.28	0.36	0.26	0.03
D	0.10	0.24	0.30	0.24	0.07

Рис. 62. Зависимость B от Q (среднее по срокам за У1-УIII 1973-1974 гг.).



суши. Для оз. Кубенского и окружающей его территории такого явления не обнаружено. Сравнением интенсивности суммарной радиации по наблюдениям на озере и посту в 6 км от озера для высот солнца более 40° при безоблачном небе установлено расхождение не более $0.01 \text{ кал.}/\text{см}^2 \cdot \text{мин.}$

Суммарная радиация в дополуденные часы больше, чем в послеполуденные, что связано с суточным ходом облачности. Доля прямой радиации в суммарной в околополуденные часы составляла в июле 1973 г. 70%, в июле 1974 г. - 58%. В августе эта величина снижается до 50% (табл. 63).

О прямой зависимости между величинами суммарной радиации и радиационного баланса свидетельствует график их связи (рис. 62). Отношение величины радиационного баланса к суммарной радиации меняется с изменением высоты солнца: при $h_0 > 40^\circ$ значение B/Q около 0.8, при $h_0 = 15^\circ - 0.4$.

В суточном ходе радиационного баланса можно выделить два периода - дневной и ночной. Переход баланса через ноль в утренние часы наблюдался в среднем через час после восхода солнца и в вечерние часы за 1-1.5 часа до захода солнца. В ночные часы величина радиационного баланса колебалась в небольших пределах - 0.08-0.11 кал./см²·мин. (табл. 64). Отношение B/Q в дневное время менялось довольно значительно, что связано с изменением как высоты солнца, так и условий облачности. Однако в августе 1972 г. из-за влияния мглы дневной ход этого отношения оказался гораздо менее выраженным.

Влияние дымной мглы сказалось также и на суточном ходе эффективного излучения (рис. 63). Обычно максимум эффективного излучения приходится на дополуденные часы, что связано как с суточным ходом облачности, так и с суточным ходом разности температур вода- воздух (табл. 65). Однако в августе 1972 г. минимум наблюдался в дополуденные часы. При ясном небе интенсивность эффективного излучения в дни с дымной мглой уменьшалась более чем на 40%. Это обстоятельство отразилось и на величине отношения эффективного излучения к поглощенной радиации (табл. 66): в дополуденные часы $E/Q(1-A)$ в августе 1972 г. почти вдвое меньше.

Величина альбедо поверхности водоема определяется многими факторами: высотой солнца, облачностью, степенью волнения, прозрачностью воды. Как показывает рис. 64, зависимость альбедо озера от высоты солнца для ясных дней выражена четко, причем

Т а б л и ц а 64

Суточный ход В (в кал./см².мин.) и отношения В / Q (в %)

	0 ³⁰	6 ³⁰	9 ³⁰	12 ³⁰	15 ³⁰	18 ³⁰	21 ³⁰
И ю ль							
1973 г.							
B B/Q	-0.11 -	0.19 56	0.58 78	0.69 81	0.50 77	0.07 37	-0.10 -
А в г у с т							
1972 г.							
B B/Q	-0.09 -	0.14 70	0.42 82	0.60 83	0.27 64	0.00 -	-0.09 -
1973 г.							
B B/Q	-0.08 -	0.10 45	0.38 72	0.53 75	0.37 71	0.00 -	-0.08 -

Т а б л и ц а 65

Суточный ход разности температур вода-воздух (°C)
на актинометрическом посту (средние месячные)

Время наблюдения	0 ³⁰	6 ³⁰	9 ³⁰	12 ³⁰	15 ³⁰	18 ³⁰	21 ³⁰	Среднее за сутки
VII 1973	(2.6)	4.6	2.2	0.9	0.2	-0.5	2.0	2.0
VIII 1972	-	(1.8)	(0.8)	(0.4)	(-1.5)	(-0.1)	(0.6)	(0.2)
VIII 1973	(1.2)	2.9	1.3	0.4	-0.4	0.0	1.3	1.1

П р и м е ч а н и е. В скобках - осредненные данные за неполный месяц.

Т а б л и ц а 66

Суточный ход отношения $E_{зфф} / Q (1-A)$

Время наблюдения	6 ³⁰	9 ³⁰	12 ³⁰	15 ³⁰	18 ³⁰
VII 1973	0.34	0.17	0.15	0.18	0.56
VIII 1972	0.26	0.11	0.09	0.25	-
VIII 1973	0.47	0.22	0.20	0.21	-

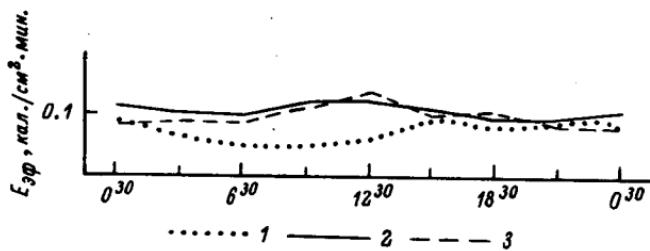


Рис. 63. Суточный ход эффективного излучения.

1 – VIII 1972 г., 2 – VII 1973 г., 3 – VIII 1973 г.

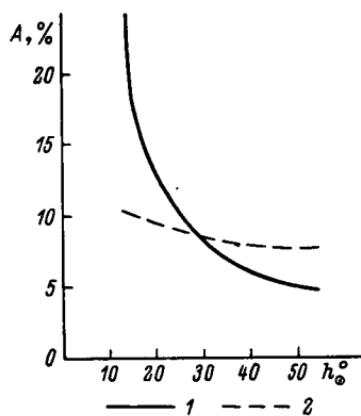


Рис. 64. Изменение альбедо поверхности воды озера в зависимости от высоты солнца.

1 – ясно, 2 – пасмурно.

наибольшие изменения приходятся на диапазон 20–40° высоты солнца. При сплошной облачности величины альбедо меняются мало: при $h_0 > 35^\circ$ они на 2–3% больше, чем в ясную погоду. Согласно данным наблюдений, влияние волнения на величину альбедо незначительно (табл. 67), и оно тем меньше, чем больше высота солнца.

Влияние изменения прозрачности воды на величину альбедо определить не удалось из-за ограниченности числа измерений при штилевых условиях и небольшого диапазона изменений прозрачности воды за время наблюдений. Поскольку изменения прозрачности по акватории озера незначительны (не более 0.2–0.3 м), величина альбедо в разных его частях остается неизменной.

Проникающая радиация. Проникающая в водную толщу солнечная радиация формирует не только тепловой режим озера, но и управляет биологическими процессами, происходящими в нем, и прежде всего процессами фотосинтеза. Тем не

Таблица 67

Альбедо (в %) суммарной радиации при различных высотах солнца в зависимости от волнения

Волнения, баллы	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
0	14.0	11.0	9.0	7.5	6.2	5.3	4.7
1-3	12.5	10.0	8.5	7.3	6.0	5.2	4.7

менее до настоящего времени наблюдения за проникающей радиацией в водоемах ведутся весьма ограниченно.

С глубиной интенсивность проникающей солнечной радиации уменьшается по мере ее поглощения и рассеяния водной массой, что определяется как свойствами воды, так и спектральным составом радиации. Глубина распространения солнечной радиации в водную толщу будет зависеть от цвета и мутности воды, от высоты солнца, состояния его диска, степени облачности и волнения. Из всех перечисленных факторов на величину ослабления радиации в водоемах основное влияние оказывают прежде всего свойства самой водной массы, в частности наличие взвесей минерального происхождения и фитопланктона.

По данным В.Б.Румянцева (разд. 4.4, наст. изд.), прозрачность воды мало меняется по акватории озера, но имеет четко выраженный сезонный ход с максимумом в июне (1.5-1.6 м) и постепенным уменьшением по мере падения уровня озера в течение лета к сентябрю-октябрю (до 0.7-0.6 м). Во время стационарных наблюдений в точке I в течение августа 1972 г. было отмечено падение прозрачности с 1.1 до 0.7 м, в июне-августе 1973 г. - с 1.5 до 0.8 м, в июле 1974 г. - с 1.2 до 1.1 м. В период маршрутных наблюдений 1974 г. в точках II-IV прозрачность составляла 1.5-1.2 м, в точке IV - 1.2-1.1 м. Интенсивное развитие фитопланктона на оз. Кубенском наблюдалось в июле-августе.

Характеристикой убывания радиации с глубиной обычно служит отношение проникающей на определенную глубину радиации (Q_z) к радиации, поглощенной поверхностью воды [$Q(1-A)$]. На рис. 65 показан дневной ход интенсивности суммарной радиации на разных глубинах для малооблачного дня при открытом солнечном диске (а) и для сплошной низкой облачности (б). При небольшой облачности в верхних горизонтах он имеет четко обозначенный максимум в полуденные часы, но глубже 1 м почти не выражен. С увеличением глубины различия сглаживаются за счет уменьшения максимальных величин в полуденные часы. При сплошной облачности даже в верхних горизонтах дневной ход выражен слабо.

Изменение относительных величин проникающей радиации в течение дня показано на рис. 66. Дневной ход изолиний плавный, причем максимальные величины приходятся на полуденные часы,

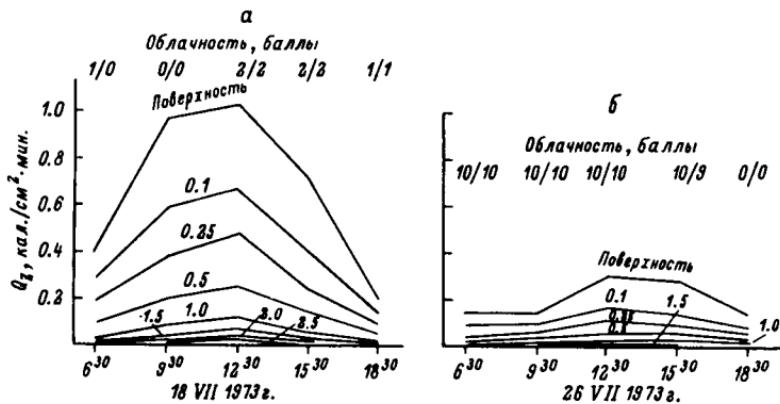


Рис. 65. Дневной ход проникающей солнечной радиации на разных глубинах при малооблачном (а, 0-2 балла) и облачном (б, 8-10 баллов) небе.

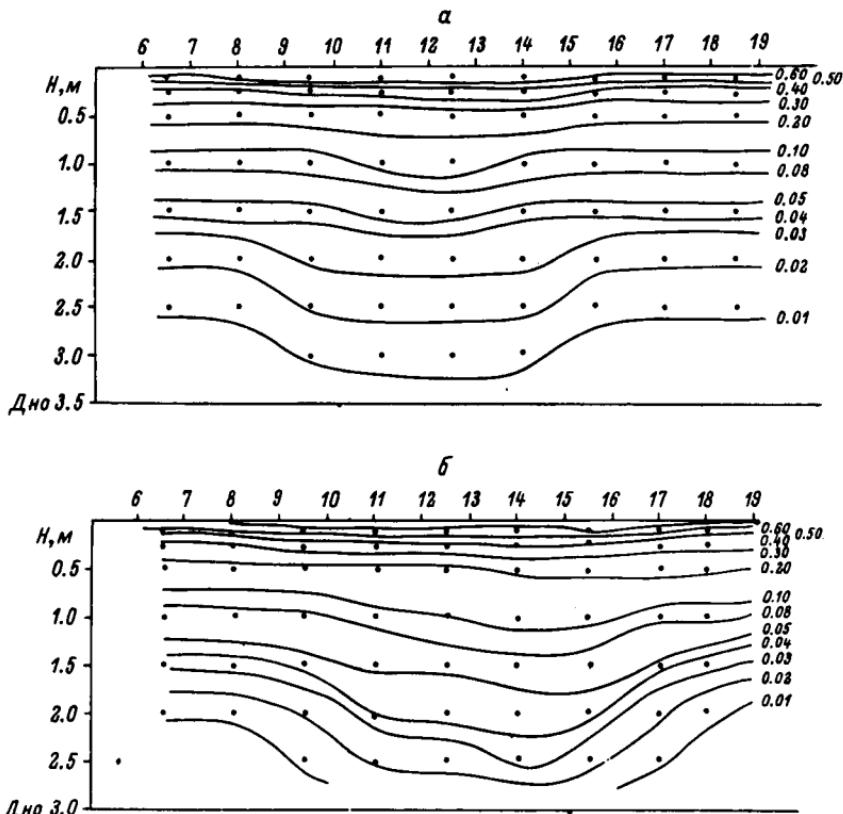


Рис. 66. Изолинии суточного хода отношения $Q_{\text{д}} / Q_{\text{в}}$ (1 - А).
 а - 18 VII 1973 г.; б - 21 VIII 1972 г.

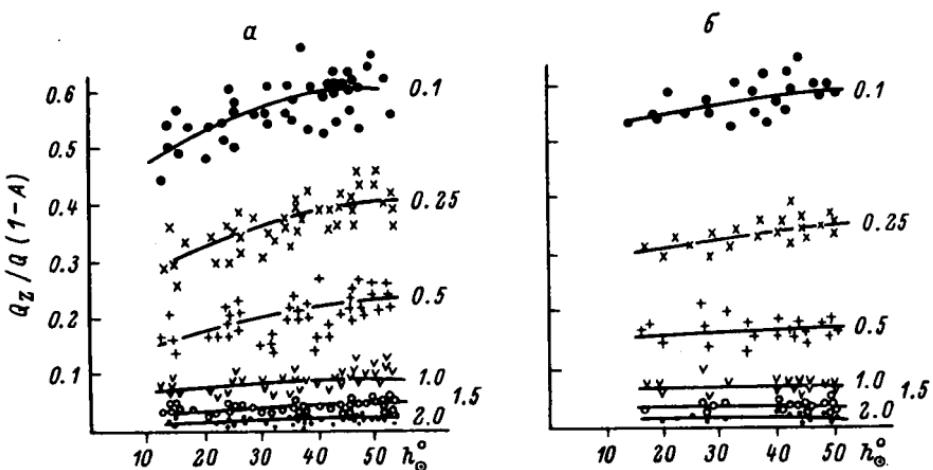


Рис. 67. Изменение отношения $Q_z / Q (1 - A)$ на различных глубинах в зависимости от высоты солнца.

а – при облачности 0–2 балла и солнце \odot^2 ; б – при облачности 8–10 баллов и солнце \odot^0 и П.

когда наибольшая высота солнца способствует возрастанию доли прямой радиации в поглощенной суммарной радиации и более глубокому ее проникновению. На рис. 67 представлены кривые изменения относительных величин проникающей радиации в зависимости от высоты солнца для штилевых условий. При ясной погоде влияние высоты солнца прослеживается до глубины 0.5 м (рис. 67, а), причем зависимость эта в верхних горизонтах не прямолинейна. При высотах солнца более 40° интенсивность и глубина проникновения солнечной радиации при ясном небе мало меняются. С увеличением глубины влияние высоты солнца уменьшается и на глубинах ниже 0.5 м уже почти не ощущается. В облачные дни зависимость проникающей радиации от высоты солнца на оз. Кубенском выражена значительно слабее (рис. 67, б).

Следует отметить, что в силу малой прозрачности воды оз. Кубенского зависимость доли проникающей на глубину радиации от высоты солнца менее выражена, чем на водоемах с высокой прозрачностью (Севан, Ладожское, Онежское, Байкал).

Ослабление радиации с глубиной на оз. Кубенском происходит очень быстро (табл. 68). Уже после прохождения первого 10-санитметрового слоя суммарная радиация теряет почти половину своей начальной величины, слой воды в 0.5 м поглощает более 80% радиации, а на глубине 3 м эта доля превышает 99%. На Рыбинском водохранилище (Рутковская, 1965) на тех же двух последних глубинах доля поглощения радиации составляет соответственно 87 и 99.7%, а на оз. Белом верхний полуметровый слой поглощает уже 99.4% радиации.

Таблица 68

Средние месячные величины отношения $Q_z/Q(1-A)$ (в %) на различных глубинах (по наблюдениям в точке I)

Месяц	0.1 м	0.25 м	0.5 м	1.0 м	1.5 м	2.0 м	2.5 м	3.0 м
VII	56	37	19	8	4	2	1.1	0.8
VIII	55	35	17	8	4	2	0.9	0.5

Уменьшение доли прямой радиации в суммарной в условиях дымной мглы сказалось и на величине отношения $Q_z/Q(1-A)$. Из сравнения данных измерения проникающей радиации при штилевых условиях и ясной погоде в точке I (рис. 2), осредненных по 5-градусным интервалам высот солнца (от 45 до 10°) для августа двух лет наблюдения – 1972 и 1973 гг., видно, что на глубинах 0.1 и 0.25 м для всех градаций высот солнца отношение $Q_z/Q(1-A)$ в 1972 г. были на 3–4% меньше, чем в 1973 г. На глубине 0.5 м это различие до высот 25–30° составляет 1–2% и не улавливается при более низких высотах солнца. Начиная с глубины 1 м влияния изменения соотношения прямой и рассеянной радиации не ощущается.

Почти постоянное волнение затрудняет установление надежной зависимости степени ослабления радиации от изменения прозрачности воды. Осреднение данных проникающей радиации, полученных в точке стационарных наблюдений (рис. 2, точка I), за три года работы экспедиции для высот солнца более 40° (только штилевые условия), показывает, что доля проникающей радиации на глубине 0.5 м при падении прозрачности с 1.5 до 1.0 м уменьшается с 25 до 15% и на глубине 1.0 м – с 10 до 5%. Резкое падение прозрачности воды в точке IY от 5 к 7 августа 1974 г., вызванное штормовым ветром юго-восточного направления, действовавшим в течение суток, показывает степень его влияния на величину проникающей радиации. Нагонная волна на небольших глубинах в этой части озера подняла со дна такое количество мути, что прозрачность с 1.2 м упала за сутки до 0.5 м. Это вызвало уменьшение относительных величин радиации в верхнем 25-сантиметровом слое с 39 до 18% и на глубине 0.5 м – с 21 до 7%.

На рис. 68 относительные величины проникающей радиации представлены в виде связи $\ln [Q_z/Q(1-A)]$ с глубиной. Полученная зависимость не прямолинейна, причем до горизонта 0.5 м кривизна линии связи более значительна, чем для нижележащих слоев. Подобный же ход кривой отмечает Е.П.Анисимова (1965) для

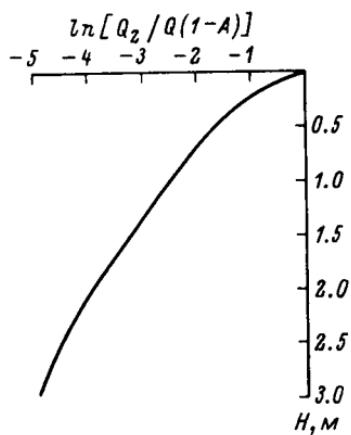


Рис. 68. Убывание суммарной радиации с глубиной (средние величины) за 1972–1974 гг. по данным стационарного пункта наблюдений на озере (рис. 2, точка 1).

Учинского водохранилища, но перелом на глубине 0.5 м у него выражен более резко.

Ослабление радиации с глубиной, подчиняясь экспоненциальному закону, приближенно описывается формулой Буге:

$$Q_z = Q (1 - A) e^{-\alpha z},$$

где α – коэффициент ослабления радиации, m^{-1} ; z – глубина, м. Иными словами, убывание радиации с глубиной определяется средним значением коэффициента ослабления α для всей толщи воды. Для оз. Кубенского коэффициент ослабления проникающей радиации был рассчитан по измерениям в штилевых условиях и волнений 1–2 балла при всех условиях облачности и прозрачности воды. Полученные данные (табл. 69, А) свидетельствуют о том, что коэффициент ослабления не остается постоянным, но средние его значения для толщи воды от поверхности до данного горизонта с глубиной становятся менее изменчивыми. Для слоя 0–3 м коэффициент ослабления солнечной радиации водой оз. Кубенского равен $1.58 - 1.60 \text{ m}^{-1}$, для того же слоя Учинского водохранилища – 1.85 m^{-1} (Анисимова, 1965). У глубоких водоемов с высокой прозрачностью воды коэффициент ослабления много ниже: для того же слоя оз. Севан, например, он равен 0.57 m^{-1} (Кириллова, 1970).

В.А. Рутковская (1965) рассчитала коэффициент ослабления для трех водоемов изучаемого района (табл. 69, Б), причем для Рыбинского водохранилища – по осредненным данным наблюдений за период VI–VIII 1959 г., а для Кубенского и Белого озер – по наблюдениям за один конкретный день августа месяца того же года. Как показывают данные табл. 69, значения коэффициента ослабления для оз. Кубенского, полученные нами и В.А. Рутковской, оказались достаточно близкими.

Поскольку изменения внешних факторов (высоты солнца, облачности и т.д.) сказываются лишь в верхнем полуметровом слое, все различия в характеристиках ниже этого слоя следует отнести уже только за счет изменения свойств самой водной массы. Значения коэффициента α , рассчитанные для каждого слоя воды, еще более подчеркивают вертикальную неоднородность водной массы (табл. 70). Они резко меняются в верхних горизонтах до глубин 0.5–1.0 м, а ниже – менее изменчивы, но непостоянны. Измере-

Т а б л и ц а 69

Изменение средних значений коэффициента ослабления α (в m^{-1})
в водоемах по глубинам

Водоем	Время наблюдений	Прозрачность, м глубина, м	0.1 м	0.25 м	0.5 м	1.0 м	1.5 м	2.0 м	2.5 м	3.0 м
Оз. Кубенское	I VI-VIII 1973	$\frac{1.4-1.0}{3.7-2.8}$	5.69	4.01	3.25	2.52	2.14	1.93	1.70	1.58
	I VII 1974	$\frac{1.5}{3.8}$	5.47	3.83	3.12	2.50	2.10	1.97	1.75	1.60
	II VII 1974	$\frac{1.5-1.2}{2.6}$	5.45	3.96	3.33	2.61	2.27	2.18	-	-
	III VII 1974	$\frac{1.5-1.4}{3.0}$	5.08	3.65	2.96	2.42	2.04	1.92	1.83	-
Б										
Оз. Кубенское	27 VIII 1959	$\frac{1.3}{3.5}$	-	-	3.7	2.8	2.7	2.5	2.2	-
Оз. Белое	23-24 VIII 1959	$\frac{0.2-1.0}{1.7-4.3}$	-	-	$10.2-4.6$	3.8	-	-	-	-
Рыбинское водохр.	VI-VIII 1959	$\frac{0.8-2.0}{6.5-13.0}$	-	-	4.4	3.5	2.6	2.2	2.1	1.9

П р и м е ч а н и е. А - данные Э.М. Гореловой, Б - данные В.А. Рутковской (1965). Римские цифры в графе "Водоем" - номера актинометрических постов на озере (рис. 2).

Т а б л и ц а 70

Изменение коэффициента ослабления α (m^{-1}) по отдельным слоям водной массы озера

Точка наблюдения в озере (рис. 2)	Время наблюдения	Прозрачность, м глубина, м	0- 0.1 м	0.1- 0.25 м	0.25- 0.5 м	0.5- 1.0 м	1.0- 1.5 м	1.5- 2.0 м	2.0- 2.5 м	2.5- 3.0 м
I	VI-VIII 1973	$\frac{1.4-1.0}{3.7-2.8}$	5.69	2.84	2.45	1.80	1.38	1.27	1.00	0.96
I	VII 1974	$\frac{1.5}{3.8}$	5.47	2.74	2.35	1.75	1.31	1.20	0.98	0.93
II	VII 1974	$\frac{1.5-1.2}{2.6}$	5.45	2.96	2.71	1.90	1.67	1.56	-	-
III	VII 1974	$\frac{1.6-1.4}{3.0}$	5.08	2.59	2.30	1.88	1.35	1.37	1.30	-

ниями на глубоких водоемах с высокой прозрачностью воды удается установить глубину того слоя, ниже которого коэффициент ослабления уже не меняется от слоя к слою. Так, для Черного моря такая глубина начинается с 11 м, где $\alpha = 0.12 \text{ м}^{-1}$, и до 15 м он остается постоянным (Кириллова, 1970).

Во всех работах, посвященных расчету коэффициента ослабления проникающей радиации (Пивоваров, Лаворко, 1960; Богуславский, 1956; Анисимова, 1965; Рутковская, 1965 и др.), есть указания на то, что отклонения от экспоненциального закона зависимости ослабления суммарной радиации с глубиной наблюдаются только в верхнем метровом слое, а ниже этой глубины закон вполне подтверждается. По-видимому, этот вывод распространяется только на глубокие водоемы с высокой прозрачностью воды, так как на малопрозрачных водоемах отклонения от этого закона наблюдаются и на более глубоких горизонтах.

Радиационный баланс за многолетний период

Радиационный баланс равен разности приходящей коротковолновой радиации, поглощенной водной поверхностью, и расхода тепла длинноволновым излучением:

$$B = Q (1 - A) - E_{\text{зфф}}$$

Факторы, определяющие величину радиационного баланса, можно разделить на две группы: факторы, не связанные непосредственно со свойствами подстилающей поверхности (высота солнца, продолжительность солнечного сияния, облачность), от чего в основном зависит приходная часть радиационного баланса, и факторы, связанные со свойствами подстилающей поверхности (альбедо поверхности, ее излучательная способность, температура деятельного слоя поверхности, вертикальные профили температуры и влажности в приземном слое), определяющие главным образом расходную часть радиационного баланса.

Солнечная радиация является основным источником энергии процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере и на суше нашей планеты. Неравномерность в распределении тепла – одна из главных причин возникновения воздушных течений. А от их характера и формы в свою очередь зависит трансформация солнечной радиации атмосферой и земной поверхностью. Эта взаимосвязь становится тем более справедливой, что в умеренной климатической зоне, куда относится изучаемый район, из двух важнейших факторов, формирующих климат, – радиационного и атмосферной циркуляции – основная роль принадлежит последнему. Влияние всех прочих климатообразующих факторов в этой зоне происходит через механизм атмосферной циркуляции (Бугаев, 1964). Таким образом, при изучении элементов радиационного (и теплового) баланса за конкрет-

ный период совершенно необходимо знать характер макросиноптических процессов за этот период, чтобы оценить, в какой мере полученные радиационные характеристики являются закономерными либо, наоборот, аномальными.

Для характеристики атмосферной циркуляции и ее климатообразующей роли на территории Вологодской и юга Архангельской областей использована типизация атмосферных процессов, разработанная Г.Я. Вангенгеймом и А.А. Гирсом. Каждая форма атмосферной циркуляции характеризуется определенным распределением облачности, осадков, воздушных течений, адвекции тепла и холода. Смена одного типа атмосферного процесса другим приводит к существенным изменениям характеристик атмосферы и гидросфера.

Еще десять лет назад А.А. Гирс, ссылаясь на достаточность накопленного материала, призывал „перейти к новому этапу в изучении теплового баланса – к изучению его характеристик по формам циркуляции и их преобразованиям различного временного масштаба“ (1966, с. 19). Но до сих пор, за редким исключением, исследования составляющих теплового баланса ограничиваются получением средних многолетних характеристик, без учета соответствующих им циркуляционных процессов. Между тем, как указывает А.А. Гирс, изучение связи составляющих теплового баланса с формами атмосферной циркуляции представляет большой интерес не только для понимания природы атмосферной циркуляции, но и для изучения причин формирования и предсказания значений теплового баланса и его отдельных составляющих. С другой стороны, характеристики (качественные и количественные) составляющих теплового баланса могут служить хорошими характеристиками форм атмосферной циркуляции и входить в число параметров, используемых для объективного расчленения процессов на формы W , C и E .

В настоящей работе сделана попытка дать совместную радиационно-циркуляционную характеристику многолетнего расчетного периода (1951–1973 гг.) для изучаемой территории Вологодской и юга Архангельской областей. При решении поставленной задачи были использованы не только экспериментальные и сетевые аниметрические наблюдения, но и расчетные методы, что оказалось целесообразным и оправданным, как это будет показано в дальнейшем, в силу достаточной четкости и однозначности полученных выводов. Но при этом необходимо ясно представлять себе, что элементы радиационного баланса, полученные расчетным методом, характеризуют лишь качественную сторону атмосферного процесса, не обеспечивая достаточную точность абсолютной величины. Расчетные методы, как правило, оправдываются лишь статистически и надежны при получении средних многолетних величин, обеспечивая для отдельных месяцев лишь знак отклонения от средней многолетней.

Для оценки положения периода 1951–1973 гг. в многолетнем ходе атмосферной циркуляции и циркуляционной обстановки каждого месяца и сезона в течение этого периода на основании календаря, составленного в АА НИИ, получены индексы типа цир-

Т а б л и ц а 71

Месячные и сезонные индексы атмосферной циркуляции
за многолетний период

Год	V	VI	VII	VIII	IX	X	V-X
1950	C(EW)	E+W	C(W)	C+E	W	E	CWE
1951	C	E	W+C	E	CWE	C+E	E+C
1952	C(E)	W(C)	C(W)	W(E)	W+E	E+C	W+C
1953	ECW	E(C)	WEC	E+W	C+W	E(WC)	E(CW)
1954	E+C	E(W)	E+W	E(W)	W	W(C)	E+W
1955	W	W+C	E+C	E(C)	E(WC)	W(E)	E+W
1956	C+W	E+W	C	W	C+W	W+C	W+C
1957	E(C)	C(WE)	E	E(C)	E+C	W	E+C
1958	W+E	E+C	ECW	C EW	C(WE)	E+C	E+C
1959	E+C	C+E	E	C+E	C+W	C	E+C
1960	E	W+C	E	E	E(CW)	EWC	E
1961	E(C)	E+W	E(W)	W(E)	C(EW)	E+W	E+W
1962	E(CW)	W(C)	E(C)	W(E)	E+W	W(CE)	E+W
1963	E	C(W)	E(C)	E(W)	E(CW)	W(E)	E(C)
1964	E+C	E(W)	E(C)	C(E)	W+C	E+C	E+C
1965	C	E+W	C(EW)	E(C)	E+W	C(W)	C+E
1966	E(CW)	E	E(W)	EWC	C+W	ECW	E
1967	E(C)	C(E)	E(C)	E	E(C)	W(E)	E(C)
1968	C+E	E	C(W)	E(C)	E+C	W+C	E+C
1969	C+E	C+E	E+C	E(C)	E+C	C(EW)	E+C
1970	E(C)	E+C	E(W)	E+C	E(C)	E(C)	E+C
1971	C(E)	E	E(C)	E	E(WC)	C+W	E(C)
1972	E	E	E	E	C+E	E(C)	E
1973	E	E(C)	E(CW)	E+C	E(CW)	W+C	E(C)
1974	E+W	E(W)	E	E	E(W)	E	E

П р и м е ч а н и е. Индекс циркуляции вида E+C или W+C означает, что оба типа циркуляции значительно превышают многолетнюю среднюю величину, а вида E(C) или W(C) – что при одном преобладающем типе второй (заключенный в скобки) находится в пределах среднего многолетнего.

куляции путем расчета их модульных коэффициентов за месяц и сезон по отношению к средней многолетней за весь период, для которого проведена данная типизация, т.е. за 1891-1974 гг. (табл. 71).

Смена широтной циркуляции на меридиональную, продолжающуюся до настоящего времени, произошла в конце 20-х годов. С 1950 г. началась последняя меридиональная эпоха, характеризующаяся чередованием процессов Е и С, с некоторым преобладанием то одного, то другого, в трех стадиях, на которые эта эпоха делится: 1950-1955 гг. - преобладание процесса типа Е, 1956-1965 гг. - чередование процессов Е и С, 1966-1974 гг. - преобладание процесса типа Е.

Таким образом, принятый расчетный период 1951-1973 гг. относится к эпохе 1950-1974 гг. со смешанной меридиональной циркуляцией Е + С. Элементы радиационного баланса рассчитаны за период 1950-1974 гг., но для теплового баланса выведены средние и за 1951-1973 гг., которые практически почти не отличаются от величин за всю циркуляционную эпоху.

Годы работы экспедиции (1972-1974 гг.) выделяются устойчивым преобладанием типа Е, за исключением отдельных месяцев (У 1974 г., VIII-IX 1973 г.), когда участие двух других типов заметно сказалось на метеорологических условиях и радиационном режиме.

Перейдем к рассмотрению основных факторов, определяющих величину радиационного баланса, и расчету составляющих его элементов.

Облачность. Многолетний режим облачности территории Вологодской и Архангельской областей формируется прежде всего под влиянием циркуляционных процессов, определяющих направление перемещения воздушных масс и их влагосодержание. В случае преобладания западного переноса (характерного для типа циркуляции W) на территорию поступают богатые влагой воздушные массы с Атлантического океана, приносящие, как правило, в теплую половину года значительную облачность с обложными осадками. Большое влияние на режим облачности оказывает близость арктических морей, особенно сильно сказывающаяся при меридиональной циркуляции типа С, когда в результате встречи разнородных воздушных течений развивается активная циклоническая деятельность (циклоны идут с северо-запада). При типе циркуляции Е

для изучаемой территории характерна небольшая облачность, что способствует возрастанию роли радиационного фактора в формировании погодного и климатического режима по сравнению с его ролью при двух других типах (W и С). Достаточно увлажненная подстилающая поверхность и значительный приток радиации при типе циркуляции Е создают условия, при которых развитие термодинамических процессов в атмосфере выражается прежде всего в восходящих конвективных потоках воздуха. Эти процессы приводят к образованию кучево-дождевой облачности с характерными для нее лив-

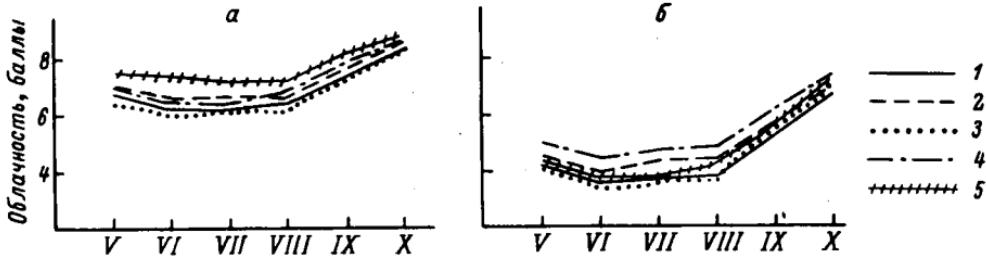


Рис. 69. Сезонный ход облачности (а – верхней, б – нижней) по средним месячным величинам за 1950–1974 гг.

1 – Коробово; 2 – Вологда; 3 – Тотъма; 4 – Чарозеро; 5 – Каргополь.

невыми осадками. Поэтому тип Е, несмотря на меньшую среднюю облачность, не всегда влечет за собой значительный дефицит осадков. Между величинами суммарной радиации и ливневыми осадками обнаружена устойчивая положительная корреляция. Для района Архангельска она равна 0.768 (Евсеев, 1958).

Средние месячные величины облачности при преобладании одного из трех типов циркуляции значительно различаются между собой (табл. 72), и лишь для октября они довольно близки. Это последнее обстоятельство в свою очередь определило отсутствие различий в радиационной характеристике всех трех типов циркуляции в этом месяце.

На рис. 69 представлен сезонный ход общей и нижней облачности для пяти станций. Минимум значений облачности приходится на июнь–август. Четко выражена синхронность в ходе сезонных изменений облачности на всех станциях, что свидетельствует об однородности циркуляционных условий. Это подтверждается совпадением знака отклонения облачности от средней многолетней одновременно по всем станциям, о чем свидетельствуют данные табл. 73. Из нее также следует, что на большой территории условия образования для общей облачности более однородны, чем для нижней.

Общая облачность имеет тенденцию к некоторому увеличению с юга на север (на ст. Коробово облачность меньше, чем на ст. Чарозеро, а на последней меньше, чем на ст. Каргополь), но разность средних месячных величин не превышает 1 балла. Нижняя облачность не обнаруживает подобной прямой зависимости от широты. Дело в том, что на образование нижней облачности, помимо циркуляционных условий общетерриториального масштаба, оказывает большое влияние характер подстилающей поверхности непосредственно вблизи пункта наблюдения. Наличие возвышенностей и

Т а б л и ц а 72

Средние месячные величины общей (числитель)
и нижней (знаменатель) облачности (в баллах)
при трех типах циркуляции за 1950–1974 гг. по ст. Коробово

Тип циркуляции	V	VI	VII	VIII	IX	X
W	7.2/5.0	7.0/4.7	—	7.4/4.8	7.6/5.2	8.5/7.0
C	6.9/4.6	7.5/4.8	6.8/4.2	6.6/4.2	7.5/5.4	8.5/7.1
E	6.0/3.6	5.9/3.0	5.6/3.0	5.7/3.1	6.8/4.5	8.4/6.7

П р и м е ч а н и е . За указанный период не было ни одного июля с преобладанием типа W.

Т а б л и ц а 73

Число случаев совпадения знака отклонения от средней многолетней облачности по 5 станциям за 1950–1974 гг.

Облачность	V	VI	VII	VIII	IX	X
Общая	18	18	18	22	20	21
Нижняя	14	16	16	19	12	16

Т а б л и ц а 74

Средняя месячная продолжительность солнечного сияния (SS)
и ее отношение к возможной (SS/SS_B) по ст. Каргополь

	V	VI	VII	VIII	IX	X	$\Sigma_{VI-VIII}$	Σ_{V-X}
SS , час.	233	274	276	216	104	46	766	1149
SS/SS_B , %	47	52	52	47	30	17	51	44

экспозиция их склонов относительно направления переноса воздушных масс влияют прежде всего на образование и распределение нижней облачности. Следствием этого является уменьшение нижней облачности на станциях Коробово и Тотьма и увеличение ее на станциях Чарозеро и Каргополь.

Доля нижней облачности по отношению к общей имеет наименьшую величину в июне месяце (ст. Коробово – 56% и ст. Каргополь – 53%) и увеличивается к весне и осени. В сентябре–октябре нижняя облачность составляет 75–85% общей. По общей облачности ве-

Таблица 75

Отношение продолжительности солнечного сияния
к возможной величине (в %) в среднем
за различные периоды

Период	VI-VIII		V-X	
	Каргополь	Тотьма	Каргополь	Тотьма
1916-1974	51	-	44	-
1919-1928 (W+E)	49	-	42	-
1929-1939 (E)	53	-	45	-
1940-1949 (C)	50	-	42	-
1950-1974 (E+C)	51	-	44	-
1950-1955 (E)	54	-	46	-
1956-1965 (E+C)	48	53	43	46
1966-1974 (E)	53	55	45	46

роятность ясных дней в летние месяцы составляет до 10%, а в октябре снижается до 1-2%. По нижней облачности та же величина изменяется от 25 до 5%. Вероятность пасмурных дней по общей облачности в июле-августе достигает 30%, но по нижней не превосходит 10%, резко увеличиваясь в сентябре-октябре до 40-50%.

Солнечное сияние. Продолжительность солнечного сияния (SS) наряду с облачностью — один из факторов, определяющих величину приходящей радиации. Облачность вносит весьма существенные корректиры в ту возможную продолжительность солнечного сияния (SS_B), которая зависит от широты места (т.е., собственно, от продолжительности дня). Таким образом, отношение действительной продолжительности солнечного сияния к ее возможной величине служит дополнительной характеристикой условий облачности. Средняя многолетняя продолжительность солнечного сияния и ее относительные величины были подсчитаны по станции Каргополь, имеющей ряд наблюдений с 1916 по 1974 г. (табл. 74).

В летние месяцы под влиянием облачности число часов солнечного сияния уменьшается примерно наполовину по сравнению с возможной величиной; в осенние месяцы это уменьшение столь значительно, что в октябре продолжительность солнечного сияния составляет лишь 17% возможного значения.

Продолжительность солнечного сияния вследствие изменения облачности значительно варьирует из года в год. Можно предположить, что изменение циркуляционных условий от эпохи к эпохе отразится и на продолжительности солнечного сияния. Такие расчеты были сделаны по многолетнему ряду станций Каргополь и Тотьма (табл. 75).

Таблица 76

Экстремальные величины продолжительности солнечного сияния по ст. Каргополь

	V	V1	VII	VIII	IX	X	$\Sigma_{VI-VIII}$	Σ_{V-X}
Максимум								
Число часов $SS/SS_8, \%$	307 62	363 67	378 72	282 62	154 44	87 32	935 62	1375 53
Год	1960	1961	1973	1955	1974	1960	1973	1973
Индекс	E	E+W	E	E(C)	E(W)	EWC	E(C)	E(C)
Минимум								
Число часов $SS/SS_8, \%$	131 26	202 38	152 29	124 27	60 17	10 4	568 38	883 34
Год	1958	1955	1968	1956	1966	1970	1968	1968
Индекс	W+E	W+C	C(W)	W	C+W	E(C)	E+C	E+C

Из приведенных данных следует, что хотя контраст между различными циркуляционными эпохами не столь уж велик (3–5%), все же намечается достаточно устойчивая тенденция увеличения относительной величины продолжительности солнечного сияния при преобладании типа E (53–54% для VI–VIII и 45–46% для V–X) и уменьшения при участии или преобладании процессов типа C и W (48–50% для V1–VIII и 42–43% для V–X). Подобная зависимость более четко проявляется у экстремальных величин периода 1950–1974 гг. (табл. 76).

Максимальной продолжительности солнечного сияния соответствует тип E, минимальной – типы W и C. Разница максимум–минимум достигает 30–40% для летних месяцев и до 20% за сезон.

П р о з р а ч н о с т ь атмосферы. Прозрачность атмосферы является одним из важнейших факторов, определяющих радиационный режим территории. Она связана с физическими процессами, происходящими в атмосфере, поэтому в свою очередь может служить критерием при анализе физического состояния атмосферы.

Величина интегрального коэффициента прозрачности атмосферы (p_2) обусловлена рассеянием солнечных лучей молекулами атмосферных газов, а также поглощением и рассеянием их водяным паром и аэрозолем, т.е. показывает степень замутненности атмосферы. Сезонный ход коэффициента прозрачности зависит прежде всего от сезонного хода влагосодержания атмосферы и присутствия в атмосфере аэрозоля. Абсолютная влажность в районах достаточно-

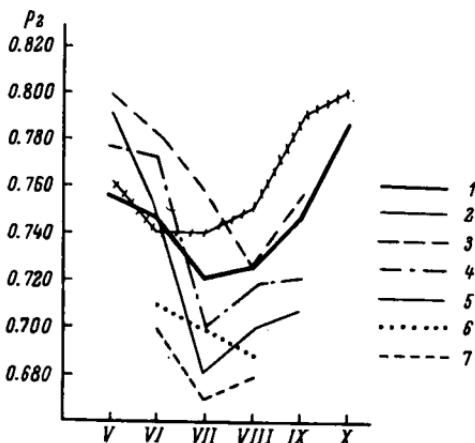


Рис. 70. Сезонный ход коэффициента прозрачности атмосферы.

По данным ст. Каргополь: 1 - средние месячные за 1955-1974 гг., 2 - 1972 г., 3 - 1973 г., 4 - 1974 г.; 5 - для широты 60° (Пивоварова, 1968); по данным поста, на Кубенском озере: 6 - 1973 г., 7 - 1974 г.

го увлажнения (куда относится и изучаемая территория) является главной причиной ослабления радиации в атмосфере, причем максимальное содержание влаги приходится на летние месяцы.

Содержание аэрозоля в атмосфере зависит не только от свойств подстилающей поверхности, но и от того, насколько интенсивно происходит перемещение воздушных масс над изучаемым районом, иначе говоря, есть ли условия для его задержки и накопления. Повышенное содержание аэрозоля в атмосфере падает также на летние месяцы, когда ветром в воздух поднимается пыль с открытой поверхности. Поэтому в сезонном ходе коэффициента прозрачности атмосферы отмечается летний минимум и осенний максимум прозрачности.

Для получения многолетнего хода коэффициента прозрачности атмосферы были использованы срочные наблюдения интенсивности прямой радиации по ст. Каргополь за весь имеющийся ряд лет - с 1955 по 1974 г. Средняя величина прозрачности за 20 лет для V-X равна 0.747, что совпадает с величиной, определенной С.И. Сивковым (1968) как нормальная прозрачность атмосферы. Максимальная сезонная величина P_2 за многолетний период равна 0.806 (1962 г.), минимальная - 0.705 (1967 г.).

На рис. 70 представлен сезонный ход коэффициента прозрачности атмосферы по ст. Каргополь в сравнении с величинами, полученными для оз. Кубенского, а также среднеширотными значениями для $\Phi = 60^{\circ}$, рассчитанными З.И. Пивоваровой (1968) за

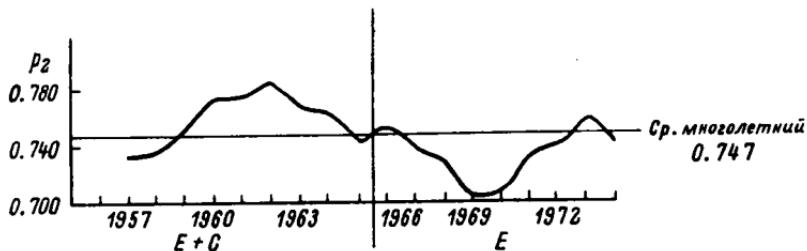


Рис. 71. Многолетний ход коэффициента прозрачности атмосферы по данным ст. Каргополь. (3-летние скользящие средние за У-Х).

период 1954-1963 гг. Сезонная среднеширотная величина P_2 на 2% больше рассчитанной по ст. Каргополь. Прозрачность атмосферы над оз. Кубенским меньше, чем в Каргополе за VI-VIII 1973-1974 гг., на 6-7%. Разница эта может объясняться как широтными различиями (прозрачность атмосферы увеличивается на каждый градус широты в среднем за теплый сезон на 1.5-2%), так и большим содержанием влаги в атмосфере при интенсивном испарении непосредственно над озером. Данные за 1972 г. для озера на рис. 70 не использованы, так как условия прозрачности атмосферы над ним и в Каргополе резко различались (дымная мгла не затронула Каргополь).

На рис. 71 показан многолетний ход изменения прозрачности атмосферы по ст. Каргополь (3-летние скользящие средние сезонных коэффициентов прозрачности за 1955-1974 гг.). В многолетнем ходе четко выражены два периода: 1955-1965 гг. и 1966-1974 гг. В первом периоде значения коэффициента прозрачности выше среднего многолетнего, во втором - ниже. Проведенная на том же рисунке граница между двумя стадиями последней циркуляционной эпохи ($E + C$ и E) позволяет предположить, что для района Каргополя в теплый период года циркуляция типа E способствует уменьшению прозрачности атмосферы, а типа C - увеличению, что достаточно хорошо согласуется с характером физических процессов в атмосфере: тип C способствует интенсивному переносу воздушных масс, тип E - образованию стационарного антициклонального состояния, при котором создаются условия для интенсивного испарения влаги и накапливания аэрозоля при длительном ветровом затишье. Таким образом, можно говорить о том, что в многолетнем ходе коэффициента прозрачности атмосферы в Каргополе за последние 20 лет наблюдается некоторая цикличность. Условия прозрачности атмосферы в период 1955-1965 гг. были более благоприятными для приходящей радиации, чем в последующий период 1966-1974 гг., и они должны были сказаться не только на интенсивности прямой радиации, но и на возможной суммарной радиации. На основании этого можно сделать предположение, что эпоха со

смешанным типом циркуляции и эпоха с преобладанием типа С для изучаемого района должны иметь более высокие характеристики прозрачности атмосферы, чем эпоха, характеризующаяся устойчивым типом Е. Чертежование различных циркуляционных условий, которое характерно для меридиональной эпохи, начавшейся с 1929 г., должно было проявиться в виде временных повышений и понижений прозрачности атмосферы при смене типа Е на С и снова на Е.

Уменьшение коэффициента прозрачности атмосферы, наблюдаемое на многих станциях Советского Союза в течение последних 10 лет, обычно рассматривается как следствие повышенного содержания аэрозоля в атмосфере, вызванное интенсивной хозяйственной деятельностью. Такая интерпретация этого явления вряд ли была бы столь односторонней, если бы в каждом конкретном случае учитывались все особенности в характере атмосферных процессов, которые оказывают подчас решающее влияние на условия атмосферной прозрачности. Влияние антропогенного фактора, так же как и собственно природных факторов, определяющих степень прозрачности атмосферы, усиливается или ослабляется для каждого конкретного пункта и периода времени в тесной связи с наблюдающимися в это время циркуляционными условиями.

Суммарная радиация для оз. Кубенского рассчитана по формуле Савинова-Онгстрема:

$$Q = Q_0 [1 - (1 - k) n],$$

где Q_0 – возможная суммарная радиация, n – облачность в долях от 1, k – коэффициент, учитывающий влияние облачности на суммарную радиацию.

Возможные суммы радиации – это те, что могут быть получены при постоянно безоблачном небе и среднем для расчетного периода состоянии прозрачности атмосферы. В радиационных расчетах большей частью используются данные о суммах радиации при безоблачном небе, полученные из непосредственных наблюдений методом В.И. Украинцева. Но этот метод приводит к завышенным величинам, так как практически дает максимально возможную величину радиации при максимально высокой прозрачности атмосферы. Наиболее правильным методом является вычисление величин возможной суммарной радиации по известному среднему для расчетного периода коэффициенту прозрачности атмосферы. Но существующая для такого расчета таблица М.С. Аверкиева (1958) получена при значении солнечной постоянной 1.908 кал./см².мин., а не 1.98 кал./см².мин., как принято в настоящее время. Поэтому для определения возможной радиации в качестве исходных данных была использована интенсивность суммарной радиации при ясном небе по ст. Каргополь за весь имеющийся период наблюдений – 1955–1974 гг. Методом трапеций по средним данным за каждый срок подсчитаны суточные суммы (на 15 число каждого месяца), затем получена месячная сумма. Возможная радиация для оз. Кубенского

Т а б л и ц а 77

Месячные суммы возможной суммарной радиации (ккал./см²·мес.) по различным пунктам наблюдений

	V	VI	VII	VIII	IX	X	Σ_{V-X}
$\psi 60^{\circ}$	1 21.2	22.6	21.8	17.0	11.1	6.2	99.9
	2 19.4	21.0	20.1	15.4	10.5	5.0	91.4
	3 18.8	20.6	19.7	15.3	10.0	5.5	89.9
Каргополь	4 19.6	20.9	19.7	15.7	9.7	5.6	91.2
	5 19.1	20.7	19.2	15.0	9.6	5.2	88.8
Вологда	6 19.9	21.4	20.9	16.6	11.2	6.1	96.1
	7 19.0	20.6	19.3	14.8	9.6	(5.9)	89.2
Оз. Кубенское	8 19.4	20.9	19.5	15.4	10.2	5.9	91.3
	9 -	-	19.6	15.9	-	-	-

П р и м е ч а н и е. 1 - по Т.Г. Берлянд (1961); 2 - по З.И. Пивоваровой (1959); 3 - по М.С. Аверкиеву (1958); 4 - средние по срочным данным за 1955-1963 гг. из Справочника по климату (1965); 5 - средние по срочным данным за 1955-1974 гг.; 6 - средние по срочным данным за 1953-1958 гг. из Справочника по климату (1965); 7 - средние по срочным данным Вологда-Семенково за 1968-1974 гг.; 8 - широтная интерполяция данных по ст. Каргополь (5) для оз. Кубенского; 9 - средние по срочным данным наблюдений за 1973-1974 гг. на оз. Кубенском.

определенена путем интерполяции данных по ст. Каргополь в соответствии с широтными градиентами. Полученные величины возможной суммарной радиации для Каргополя и оз. Кубенского приведены в табл. 77 наряду с величинами суммарной радиации при ясном небе для Каргополя и Вологды из „Справочника по климату СССР“ (1965).

Суммы возможной суммарной радиации для ст. Каргополь, рекомендуемые Справочником, получены из осредненных данных срочных наблюдений за 1955-1963 гг. Эти величины оказались несколько выше, чем средние за 1955-1974 гг., чего и следовало ожидать, судя по циркуляционным условиям последних 25 лет и связанными с ними изменениями прозрачности атмосферы. По ст. Вологда нет непрерывного ряда актинометрических наблюдений, но сравнением средних величин за 1953-1958 гг. (Справочник..., 1965) и 1968-1974 гг. (рассчитанные по срочным данным ст. Вологда-Семенково) обнаружена значительная разница между ними, видимо, свидетельствующая о том, что уменьшение прозрачности атмосферы, вообще характерное для типа Е, усугубляется еще близостью большого индустриального города.

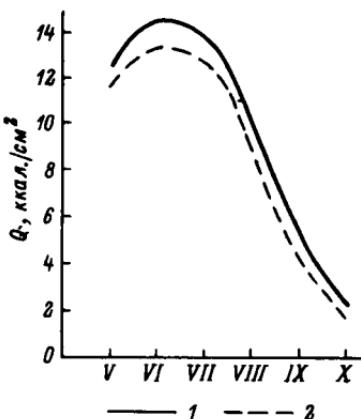


Рис. 72. Сезонный ход средних месячных величин суммарной радиации.

1 – для оз. Кубенского (средние за 1950–1974 гг., рассчитанные по формуле Савинова–Онгстрема); 2 – по данным ст. Каргополь (средние наблюденные за 1955–1974 гг.).

Приведенные в табл. 77 величины возможной суммарной радиации для $\Psi = 60^\circ$ по данным З.И. Пивоваровой (1959), а также по Т.Г. Берлянд (1961), и взятые для той же широты из таблицы М.С. Аверкиева (1958) по среднему многолетнему коэффициенту прозрачности атмосферы для ст. Каргополь свидетельствуют, что полученные по таблице М.С. Аверкиева суммы возможной радиации все же ближе к рассчитанным средним за 1955–1974 гг., чем среднеширотные данные по З.И. Пивоваровой и Т.Г. Берлянд. В табл. 77 приведены также величины суммарной радиации при ясном небе, определенные по данным наблюдений актинометрического поста на оз. Кубенском, оказавшиеся довольно близкими к рассчитанным величинам.

Коэффициент k в формуле Савинова–Онгстрема показывает, какая доля солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу облаков, достигает земной поверхности. Он зависит от формы и свойств облаков, а также от характера подстилающей поверхности. Этот коэффициент был рассчитан по месячным величинам суммарной радиации и средней месячной облачности в Каргополе и его значения следующие:

V	0.44
VI	0.49
VII	0.50
VIII	0.42
IX	0.30
X	0.25

Т а б л и ц а 78

Суммарная радиация (в ккал./см². мес.)
на оз. Кубенском за многолетний период

Год	V	VI	VII	VIII	IX	X	Σ_{V-X}
1950	12.8	14.6	12.0	9.7	4.5	2.4	55.8
1951	12.8	14.1	13.3	12.0	5.9	2.2	60.2
1952	11.2	13.8	13.1	9.2	4.3	1.8	54.6
1953	12.0	14.8	13.9	9.0	4.8	2.3	56.8
1954	11.8	13.9	13.7	8.8	5.5	2.2	55.8
1955	11.8	12.9	14.4	11.8	5.5	2.2	58.8
1956	12.4	15.6	12.3	8.7	5.5	2.5	57.0
1957	13.0	13.5	14.6	9.4	4.8	2.2	57.5
1958	11.6	13.9	13.9	9.2	4.8	2.1	55.5
1959	14.0	14.4	15.0	11.9	4.6	2.2	62.0
1960	14.4	13.7	14.8	10.0	4.6	2.6	60.0
1961	12.8	15.8	12.7	8.7	5.5	2.2	57.8
1962	11.6	13.5	12.7	9.0	4.9	2.2	53.9
1963	13.4	12.7	13.5	10.0	6.2	1.9	57.6
1964	11.8	16.0	13.9	9.2	5.4	2.2	58.5
1965	11.6	15.2	13.1	10.3	5.6	2.1	57.8
1966	12.8	15.2	13.9	8.7	4.3	2.4	57.3
1967	12.6	14.1	14.4	9.2	5.9	2.2	58.4
1968	12.0	14.6	12.1	9.7	5.6	2.0	55.9
1969	11.8	13.5	13.5	10.0	4.6	2.1	55.4
1970	13.2	14.4	13.9	9.8	4.8	1.7	57.8
1971	12.8	14.6	13.1	10.3	5.6	2.4	58.1
1972	12.8	15.2	15.2	11.0	5.6	2.0	62.6
1973	14.2	14.8	15.0	10.3	4.8	2.4	61.5
1974	11.4	15.2	13.9	9.5	6.3	2.2	58.5
Среднее за 1950- 1974	12.2	14.4	13.7	9.8	5.1	2.2	57.4

Таблица 79

Средние месячные и экстремальные величины суммарной радиации (в ккал./см²) за 1950–1974 гг. по оз. Кубенскому при трех типах циркуляции

	V	VI	VII	VIII	IX	X	Σ_{V-X}
W	11.8	13.6	—	8.8	5.0	2.1	
C	12.2	13.4	12.5	9.2	5.1	2.1	
E	13.1	14.7	14.3	10.6	5.6	2.1	
Максимум Год	14.4 1960	16.0 1964	15.2 1972	12.0 1951	6.3 1974	2.6 1960	62.6 1972
Индекс	E	E(W)	E	E	E(W)	ECW	E
Минимум Год	11.2 1952	12.7 1963	11.9 1968	8.7 1956	4.3 1966	1.7 1970	53.9 1962
Индекс	C(E)	C(W)	c(W)	W	C+W	E(C)	E+W
Амплитуда	3.2	3.3	3.3	3.3	2.0	0.9	8.7

Месячные значения коэффициента λ были использованы при расчете суммарной радиации по всем трем озерам – Кубенскому, Воже и Лача. Возможность такой интерполяции основана на выводе З.И. Пивоваровой (1975) о том, что радиационные свойства облаков одной и той же формы в пределах большой территории близки между собой. За показатель условий облачности над оз. Кубенским приняты средние месячные величины облачности по ст. Коробово. Рассчитанные величины суммарной радиации для оз. Кубенского в среднем за многолетний период и за отдельные годы приведены в табл. 78.

Как показывает их сезонный ход в сравнении с наблюденными величинами по ст. Каргополь (рис. 72), максимальные величины суммарной радиации приходятся на июнь месяц. На май–август падает около 70% сезонной суммы приходящей радиации. Доля суммарной радиации, достигающей земной поверхности, в июне–июле составляет почти 70% ее возможной величины, в мае и августе она превышает 60%, около 50% – в сентябре и менее 40% – в октябре. В Каргополе величина отношения Q/Q_0 на 3–5% меньше, чем на оз. Кубенском, что хорошо согласуется с меньшими значениями облачности в Коробове по сравнению с Каргополем.

В 1972–1973 гг. суммарная радиация значительно превышала среднюю многолетнюю величину (в 1972 г. сумма за сезон на 5.6 ккал./см² больше средней многолетней). В 1974 г. это превышение незначительно (на 1.1 ккал./см²). В 1956 г. суммарная радиация меньше средней многолетней.

Таблица 80

Средние месячные и экстремальные величины суммарной радиации и их амплитуда (в ккал./см².мес) за разные периоды по ст. Каргополь

	У	VI	VII	VIII	IX	X	Σ_{V-X}
1955-1974 гг.							
Среднее	11.4	13.2	12.7	8.8	4.3	1.8	52.2
<u>Максимум</u>	<u>15.3</u>	<u>17.2</u>	<u>16.3</u>	<u>12.5</u>	<u>5.9</u>	<u>2.9</u>	<u>63.5</u>
Год	1960	1961	1959	1960	1963	1960	1959
Индекс	E	E+W	E	E	E(CW)	EWC	E+C
<u>Минимум</u>	<u>9.0</u>	<u>9.5</u>	<u>9.1</u>	<u>5.2</u>	<u>2.0</u>	<u>0.8</u>	<u>43.4</u>
Год	1968	1957	1968	1956	1957	1957	1956
Индекс	C+E	C(WE)	C(W)	W	E+C	W	W+C
Амплитуда	6.3	7.7	7.2	7.3	3.9	2.1	20.1
1956-1965 гг.							
Среднее	11.6	13.5	12.7	8.7	4.3	1.8	52.6
<u>Максимум</u>	<u>15.3</u>	<u>17.2</u>	<u>16.3</u>	<u>12.5</u>	<u>5.9</u>	<u>2.9</u>	<u>63.6</u>
Год	1960	1961	1959	1960	1963	1960	1959
Индекс	E	E+W	E	E	E(CW)	EWC	E+C
<u>Минимум</u>	<u>9.2</u>	<u>9.5</u>	<u>9.2</u>	<u>5.2</u>	<u>2.0</u>	<u>0.8</u>	<u>43.4</u>
Год	1957	1957	1956	1956	1957	1957	1956
Индекс	E(C)	C(WE)	C	W	E+C	W	W+C
Амплитуда	6.1	7.7	7.1	7.3	3.9	2.1	20.1
1966-1974 гг.							
Среднее	11.0	13.1	12.7	8.7	4.4	1.7	51.6
<u>Максимум</u>	<u>13.2</u>	<u>15.4</u>	<u>15.6</u>	<u>10.6</u>	<u>6.2</u>	<u>2.1</u>	<u>58.1</u>
Год	1966	1974	1973	1971	1974	1974	1971
Индекс	E(CW)	E(W)	E(CW)	E	E(W)	E	E(C)
<u>Минимум</u>	<u>9.0</u>	<u>10.2</u>	<u>9.1</u>	<u>7.3</u>	<u>2.8</u>	<u>1.1</u>	<u>43.7</u>
Год	1968	1967	1968	1966	1966	1970	1968
Индекс	C+E	C(E)	C(W)	EWC	C+W	E(C)	E+C
Амплитуда	4.2	5.2	6.5	3.3	3.4	1.0	14.4

Экстремальные и средние месячные величины суммарной радиации за период 1950–1974 гг. (табл. 79) свидетельствуют о том, что меридиональная циркуляция типа Е определяет повышенные значения месячных величин суммарной радиации, а типы W и С – пониженные. Для двух периодов (1956–1965 и 1966–1974 гг.) реального ряда наблюдений по ст. Каргополь (табл. 80), различных по циркуляционным условиям, средние за период месячные величины либо вообще не различаются, либо различаются очень незначительно. Но экстремальные величины за весь период 1955–1974 гг., собственно, приходятся на период 1956–1965 гг., а за 1966–1974 гг. более близки к средним многолетним величинам; в соответствии с этим и амплитуды крайних значений в этот период меньше. Таким образом, период 1956–1965 гг. при тех же средних величинах отличается значительно большими межгодовыми контрастами в приходе суммарной радиации. Как следует из табл. 80, максимальные величины суммарной радиации в Каргополе наблюдались в те месяцы, когда преобладала циркуляция типа Е, минимальные – при преобладании типов С и W, т.е. выдерживаются те же зависимости, что и установленные при анализе рассчитанных данных для оз. Кубенского (табл. 79).

Суммарная радиация является сравнительно устойчивым во времени метеорологическим элементом, и для получения надежной средней многолетней величины считается достаточным иметь 10-летний ряд наблюдений. Но межгодовая изменчивость величин суммарной радиации существенно возрастает при смене одного меридионального типа другим (переводение Е в С в период 1956–1965 гг.) и уменьшается при устойчивом преобладании одного из типов (тип Е в период 1966–1974 гг.). По-видимому, можно предположить, что преобладание только типа W или С также уменьшает межгодовые контрасты. Отсюда следует, что все критерии оценки точности определения средних многолетних величин, основанные на межгодовой изменчивости и отклонениях от средних многолетних величин, применимы лишь к тому ряду и тем циркуляционным условиям, для которых они получены.

Альбедо и поглощенная радиация. Расчет альбедо суммарной радиации поверхности воды оз. Кубенского произведен двумя способами: по соотношению числа ясных и пасмурных дней и по формуле П.П. Кузьмина (1939):

$$A_Q = \frac{S'}{Q} A_S + \frac{D}{Q} A_D,$$

где A_S – альбедо для прямой радиации, A_D – альбедо для рассеянной радиации.

Доля прямой и рассеянной радиации определяются по средней месячной облачности (n):

$$\frac{S'}{Q} = \frac{1-n}{1-0.75n}; \quad \frac{D}{Q} = \frac{0.25n}{1-0.75n}.$$

Таблица 81

Альбедо (в %) поверхности воды озера

Год	V	VI	VII	VIII	IX	X
Рассчитанные						
Среднее за 1950-						
1974	8.5	7.5	8.0	9.5	10.5	13.0
1956	8.5	7.0	8.0	10.0	10.0	13.0
1972	8.5	7.5	8.0	8.0	10.0	13.0
1973	8.5	7.5	8.0	9.0	10.5	13.0
1974	10.0	7.0	8.0	9.5	9.5	13.0
Наблюденные						
1972	-	-	-	8.5	-	-
1973	-	-	7.8	9.4	-	-
1974	-	-	7.6	9.5	-	-

A_S и A_D определены как отношение дневных сумм суммарной и отраженной радиации для ясного и пасмурного дня по данным полевых наблюдений. Месячные величины, полученные двумя способами, различаются очень незначительно (на 1% и лишь в единичных случаях на 2%). В табл. 81 приведены значения альбедо для тех лет, за которые рассчитывался тепловой баланс озера. Рассчитанные величины альбедо достаточно хорошо согласуются с непосредственно измеренными. Полученные Е.А. Зайцевой (1965) для Рыбинского водохранилища значения альбедо довольно близки к величинам по оз. Кубенскому. За период 1959–1966 гг. альбедо Рыбинского водохранилища составляет в июне–августе 8%, в сентябре – 10% и в октябре – 13%.

Месячные величины поглощенной радиации определяются месячными величинами суммарной радиации и альбедо водной поверхности, т.е. $B_K = Q(1 - A)$ (табл. 82). Характер взаимосвязи величин поглощенной радиации с типами атмосферной циркуляции такой же, что и для суммарной радиации: наибольшие величины соответствуют типу E, наименьшие – C и W. Сезонное распределение поглощенной радиации почти повторяет сезонное распределение суммарной радиации: на период нагревания (V–VII) приходится 70% от сезонной суммы поглощенной радиации.

Эффективное излучение. Расходная часть радиационного баланса водной поверхности – эффективное излучение –

Таблица 82

Поглощенная радиация (в ккал./см². мес.) озера

Год	У	VI	VII	VIII	IX	X	Σ_{Y-X}
Среднее за 1950- 1974	11.1	13.2	12.6	9.0	4.6	1.9	52.4
Среднее за 1951- 1973	11.2	13.3	12.7	9.1	4.6	1.9	52.8
1956	11.3	14.4	11.3	7.9	4.9	2.2	52.0
1972	11.6	14.0	14.1	10.9	5.0	1.7	57.2
1973	13.0	13.6	13.9	9.4	4.3	2.1	56.2
1974	10.2	14.1	12.8	8.7	5.7	1.9	53.3
Максимум	13.2	14.9	14.1	10.9	5.7	2.2	57.2
Год	1960	1964	1972	1972	1974	1956	1972
Индекс	E	E(W)	E	E	E(W)	W+E	E
Минимум	10.1	11.6	10.9	7.8	3.8	1.5	46.5
Год	1952	1963	1950	1961	1966	1970	1952
Индекс	C(E)	C(W)	C(W)	W(E)	C+W	E(C)	W+C
Амплитуда	3.1	3.3	3.2	3.1	1.9	0.7	10.7

определяется разностью восходящего и нисходящего потоков длинноволновой радиации и зависит от термического режима поверхности и метеорологических условий пограничного слоя атмосферы. Эффективное излучение растет с увеличением температуры воздуха и уменьшается с увеличением его влажности. В условиях достаточно го увлажнения изучаемой территории, и тем более над водной поверхностью, рост температуры сопровождается увеличением влажности, что приводит к ослаблению степени изменения эффективного излучения. Увеличение облачности и запыленности атмосферы вызывает увеличение встречного длинноволнового излучения атмосферы и уменьшение эффективного излучения.

Эффективное излучение поверхности воды оз. Кубенского определялось по формуле Т.В. Кирилловой (1970), предложенной для расчета эффективного излучения внутренних водоемов:

$$E_{\text{эфф}} = \delta \beta T^4 (0.41 - 0.05 \sqrt{\theta}) (1 - cn) + 0.00344T + 0.0065,$$

где δ - коэффициент, характеризующий отражательную способность воды (0.91); β - постоянная Стефана-Больцмана (0.814×10^{10} кал./см².мин.град.⁻⁴); T - температура воздуха, град.

Таблица 83

Эффективное излучение поверхности воды озера
(в ккал./см². мес.) за многолетний период

Год	Y	YI	YII	YIII	IX	X	$\Sigma Y-X$
1950	3.3	3.1	2.5	2.9	2.2	2.6	16.6
1951	3.6	2.9	2.9	3.6	3.1	2.6	18.7
1952	2.5	3.0	2.8	2.9	2.2	2.4	15.8
1953	3.0	2.9	2.9	2.7	2.8	2.6	16.9
1954	2.6	2.6	3.0	2.6	2.9	2.3	16.0
1955	2.8	2.5	3.3	3.9	2.6	2.4	17.5
1956	3.2	3.2	2.8	2.8	2.9	2.9	17.8
1957	3.0	2.7	3.3	2.8	2.6	2.4	16.8
1958	2.5	3.0	3.2	2.8	2.7	2.4	16.6
1959	3.8	3.1	3.5	4.0	2.7	2.6	19.7
1960	3.8	3.0	3.4	3.3	2.5	3.0	19.0
1961	2.7	3.4	2.8	2.7	3.2	2.6	17.4
1962	2.8	3.2	2.8	3.0	2.7	2.4	16.9
1963	2.8	2.6	2.9	3.2	3.0	2.4	16.9
1964	2.7	3.5	3.2	3.0	2.8	2.5	17.7
1965	2.7	3.2	3.2	3.4	2.9	2.4	17.8
1966	3.0	3.5	3.3	2.8	2.3	2.6	17.5
1967	3.0	3.1	3.6	2.8	3.2	2.3	18.0
1968	3.2	3.1	2.9	3.0	2.9	2.6	17.7
1969	2.9	3.2	3.1	3.3	2.6	2.5	17.6
1970	3.5	3.2	3.4	3.1	2.6	2.2	18.0
1971	3.0	3.3	3.0	3.3	3.0	2.8	18.4
1972	3.2	3.4	3.5	3.6	2.8	2.4	18.9
1973	3.5	3.1	3.7	3.1	2.7	2.9	19.0
1974	2.4	3.4	3.4	3.0	3.2	2.4	17.8
Среднее за 1950- 1974	3.0	3.1	3.1	3.1	2.8	2.6	17.7

Кельвина; θ – абсолютная влажность, мб; π – облачность (в долях от 1); c – коэффициент, характеризующий влияние облачности на эффективное излучение; ΔT – разность температур вода– воздух.

Наличие облачности над сушей влечет за собой значительное уменьшение температуры ее поверхности, а на поверхности воды при тех же условиях температура меняется незначительно. Следовательно, и на эффективном излучении водной поверхности влияние облачности оказывается меньше. Значения коэффициентов, определяющих влияние облачности, для водной поверхности, как установлено Т.В. Кирилловой, составляет 0.8 величины коэффициента для суши. Была сделана попытка определить значение коэффициента c по наблюдениям на оз. Кубенском, где эффективное излучение определялось как разность поглощенной радиации и радиационного баланса. Но условия переменной облачности, характерные для полевых сезонов 1972–1974 гг., не позволили выделить достаточное количество наблюдений при сплошной облачности, необходимых для получения надежно обоснованных величин. По 154 случаям, когда облачность была $10/\pi$ (при $0 \geq \pi \geq 10$) баллов, средний коэффициент оказался равным 0.55 при большом разбросе величин, использованных для осреднения. Поэтому коэффициент c был определен как среднеширотный коэффициент для суши, равный 0.75, умноженный на 0.8, что составило 0.6.

Необходимые для расчета эффективного излучения данные по температуре поверхности воды, температуре и влажности воздуха над оз. Кубенским получены А.И. Тихомировым и А.Ф. Изотовой. Рассчитанные по формуле Т.В. Кирилловой величины эффективного излучения представлены в табл. 83.

Поскольку месячная сумма эффективного излучения водной поверхности зависит не только от метеорологических условий текущего месяца, но и от температуры воды, обладающей значительной инерцией, естественно ожидать, что экстремальные величины не всегда будут отвечать характеру атмосферной циркуляции за данный календарный месяц. Как уже указывалось в разделе, посвященном суммарной радиации, наибольшие ее величины наблюдаются при устойчивом преобладании типа E . Высокие значения суммарной радиации обеспечивают интенсивный прогрев водной массы и высокую температуру поверхности воды. Поэтому одна из причин появления больших значений эффективного излучения в каком-либо месяце – достаточный для этого теплозапас водной массы, приобретенный за предшествующий месяц. Другой очень важный фактор, определяющий величину эффективного излучения – облачность, зависит от циркуляционных условий текущего месяца. Значительное уменьшение средней месячной облачности в летний период, как уже говорилось, также связано с преобладанием типа E . Именно такие сочетания – сохранение типа E в расчетном и предшествующем месяце – обеспечивают, как правило, максимально высокие величины эффективного излучения. Из табл. 84 видно, что максимальным величинам эффективного излучения всегда соответствует и пред-

Таблица 84

Средние месячные и экстремальные величины эффективного излучения (в ккал./см². мес.) за 1950–1974 гг. по оз. Кубенскому при трех типах циркуляции

	У	VI	VII	VIII	IX	X	$\Sigma Y-X$
W	2.8	2.5	-	2.8	2.6	2.4	-
C	3.0	2.6	2.9	3.0	2.8	2.5	-
E	3.1	3.1	3.3	3.2	2.9	2.4	-
Среднее							
E_0	5.6	5.1	5.0	5.1	5.1	5.4	31.3
E_n	3.4	3.2	3.1	3.1	2.8	2.7	18.3
$E_{\text{эфф}}$	3.0	3.1	3.1	3.1	2.8	2.6	17.7
$E_n/E_0 \%$	61	63	63	61	55	50	58
$E_{\text{эфф}}/E_0 \%$	54	61	63	61	55	47	56
Максимальные							
E_0	5.7	5.1	5.2	5.1	5.1	5.4	-
E_n	4.1	3.5	3.7	3.8	3.3	2.9	-
$E_{\text{эфф}}$	3.8	3.5	3.7	4.2	3.2	3.0	19.7
$E_n/E_0 \%$	72	69	72	74	65	54	-
$E_{\text{эфф}}/E_0 \%$	67	69	72	78	63	56	-
Год	1960	1966	1973	1959	1974	1960	1959
Индекс	E → E	E → E	E → E(CW)	E → C+E	E → E(W)	E → EWC	E+C
Минимальные							
E_0	5.4	5.1	5.0	4.9	4.9	5.3	
E_n	2.9	2.8	2.6	2.6	2.5	2.6	
$E_{\text{эфф}}$	2.4	2.5	2.5	2.6	2.2	2.3	15.8
$E_n/E_0 \%$	54	54	52	53	51	49	
$E_{\text{эфф}}/E_0 \%$	44	49	50	53	45	43	
Год	1974	1955	1950	1954	1950	1954	1952
Индекс	C → E+W	W → W+C	E → W → -C(W)	E → W → -E(W)	C + E → -W	W → W(C)	W+C
Отношение макс./миним., %							
E_0	95	100	98	96	98	98	
E_n	71	80	70	68	73	90	
$E_{\text{эфф}}$	63	71	68	65	69	77	
Разность отношений макс./миним., %							
$E_0 - E_n$	22	20	28	28	25	8	
$E_n - E_{\text{эфф}}$	8	9	2	3	4	13	

шествует месяц с индексом E (что обозначено как $E \rightarrow E$), а минимальным – типы W и C , либо значительное их участие в сочетании с типом E .

Из табл. 84 также следует, что пределы изменения E_0 (эффективное излучение при ясном небе без учета разности температур вода–воздух) невелики как в сезонном ходе, так и между экстремальными по значениям эффективного излучения месяцами. Наибольшая разница для последнего достигает 5%. Объясняется это устойчивой корреляцией между температурой воздуха и его абсолютной влажностью над водной поверхностью. Влияние облачности (E_n) снижает эффективное излучение до 63–50% от его величины при безоблачном небе. В среднем за сезон эта величина составляет 58% от E_0 . Разность температур вода–воздух на оз. Кубенском в среднем за 1950–1974 гг. очень незначительна: ее максимальная средняя месячная величина в июле месяце лишь 2.1° . Поправка на разность температур в летние месяцы почти не влияет на величину эффективного излучения, в переходные месяцы (Y и X) она несколько снижает его. В среднем за открытый период за счет температурной поправки эффективное излучение снижается еще на 2% от E_0 :

В месяцы с максимальными значениями эффективного излучения влияние облачности меньше, чем в среднем за многолетний период ($E_{\text{эфф}}$ составляет 70% от E_0). Поправка на разность температур не превышает 5% от величины E_0 . В месяцы с минимальными значениями эффективного излучения облачность почти наполовину снижает его величину при ясном небе, температурная поправка достигает значительно больших значений (до 10%), действуя, как правило, в сторону уменьшения величины $E_{\text{эфф}}$. Как показывает разность отношений максимальных величин к минимальным, экстремальные значения эффективного излучения вызываются в основном облачностью, влияние разности температур проявляется главным образом в октябре.

Величины эффективного излучения, рассчитанные по методу Т.В. Кирилловой (табл. 85), для летних месяцев оказываются несколько меньшими, чем полученные другими методами.

Сравнение эффективного излучения оз. Кубенского со среднеширотными значениями его для суши (Барашкова и др., 1961) показывает, что в период нагревания эффективное излучения суши выше (на 0.5–0.7 ккал./ см^2 . мес.), а в период охлаждения – ниже (на 0.4–0.8 ккал./ см^2 . мес.). Разница может быть целиком отнесена за счет различий в сезонном ходе температуры поверхности суши и воды. Сезонная амплитуда эффективного излучения суши почти в 4 раза больше, чем водной поверхности.

Радиационный баланс. По рассчитанным величинам суммарной радиации, альбедо и эффективного излучения получен радиационный баланс оз. Кубенского (табл. 86). Сезонный средний многолетний его максимум приходится на июнь месяц, что соответствует и сезонному максимуму суммарной радиации, но

Таблица 85

Эффективное излучение (в ккал./см².мес.),
рассчитанное различными методами

Метод	У	VI	VII	VIII	IX	X
Т.В. Кирилловой (1970 г.)	3.0	3.1	3.1	3.1	2.8	2.6
Н.А. Ефимовой (1961 г.)	2.7	3.2	3.5	3.3	2.8	2.4
Т.Г. Берлянд (1952 г.)	2.9	3.2	3.5	3.4	3.0	2.8
Э.Ричардсона (1929 г.)	2.6	3.3	3.8	3.6	3.1	2.8
ГГО (номограмма для океанов) (1974 г.)	3.0	3.5	3.8	3.7	2.8	2.4

в отдельные годы попадает и на июль (1973 г.). В октябре величины радиационного баланса отрицательны. Отношение месячных величин радиационного баланса к месячным величинам суммарной радиации (за месяцы с положительным балансом) меняется от 0.70 в июне-июле до 0.35 в сентябре. За сезон это отношение равно 0.61. Сумма радиационного баланса за период нагревания озера май-июль составляет около 80% от суммы за сезон.

В соответствии экстремальных величин радиационного баланса за период 1950–1974 гг. определенным циркуляционным условиям и в ходе средних месячных величин для каждого из трех типов циркуляции (табл. 87) усматривается тот же характер, что и для суммарной радиации: максимальным величинам радиационного баланса отвечают циркуляционные условия типа *E*, минимальным – типы *W* и *C*, причем средние месячные величины при типе *W* несколько ниже, чем при типе *C*, что наблюдалось и для суммарной радиации.

Полного совпадения даты наблюдения экстремальных величин за период 1950–1974 гг. для радиационного баланса и суммарной радиации (табл. 79 и табл. 87) не наблюдается, так как увеличение или уменьшение прихода солнечной радиации влечет за собой и соответствующие изменения расходной части (эффективного излучения и отраженной радиации), и радиационный баланс суммирует эти изменения. При недостаточной точности расчетного метода спределения месячных абсолютных величин составляющих радиационного баланса (особенно экстремальных значений) такого несовпадения и следовало ожидать. Месячные амплитуды радиационного баланса в 1.5 раза меньше, чем суммарной радиации.

Т а б л и ц а 86

Радиационный баланс оз. Кубенского
(в ккал./см². мес.) за многолетний период

Год	У	УІ	УІІ	УІІІ	ІХ	Х	Σ_{Y-X}
1950	8.4	10.4	8.4	5.8	1.8	-0.4	34.4
1951	8.0	10.1	9.3	7.3	2.2	-0.6	36.2
1952	7.6	9.7	9.3	5.4	1.6	-0.8	32.7
1953	7.8	10.7	9.9	5.4	1.5	-0.6	34.7
1954	8.2	10.2	9.6	5.2	2.1	-0.4	34.9
1955	7.9	9.3	10.0	7.0	2.4	-0.4	36.1
1956	8.7	11.4	8.4	5.1	2.0	-0.7	34.4
1957	9.0	9.7	10.2	5.7	1.7	-1.2	35.1
1958	8.0	9.9	9.5	5.5	1.6	-0.6	33.9
1959	9.0	10.1	10.4	6.9	1.4	-0.8	37.0
1960	9.3	9.6	10.3	5.9	1.6	-0.9	35.8
1961	9.0	11.2	8.8	5.2	1.8	-0.7	35.3
1962	7.7	9.2	8.8	5.1	1.7	-0.6	32.0
1963	9.7	9.1	9.5	5.8	2.6	-0.7	35.9
1964	8.8	11.4	9.6	5.2	2.0	-0.6	36.6
1965	7.8	10.8	8.8	6.0	2.1	-0.5	35.2
1966	8.7	10.5	9.5	5.0	1.5	-0.5	34.6
1967	8.4	10.0	9.7	5.4	2.1	-0.5	35.2
1968	7.6	10.3	8.2	5.6	2.0	-0.9	32.9
1969	7.8	9.2	9.3	5.7	1.5	-0.7	32.8
1970	8.5	10.0	9.4	5.8	1.7	-0.6	34.6
1971	8.1	10.1	9.0	5.9	2.0	-0.7	34.4
1972	8.5	10.7	10.6	7.4	2.2	-0.6	38.6
1973	9.5	10.6	11.0	7.0	1.6	-0.8	37.5
1974	8.0	10.6	9.6	5.7	2.5	-0.6	35.9
Среднее за 1950- 1974	8.2	10.2	9.5	5.8	1.8	-0.6	35.0

Таблица 87

Средние месячные и экстремальные величины радиационного баланса (в ккал./см².мес.) за 1950-1974 гг. по оз. Кубенскому при трех типах циркуляции

	Y	YI	YII	YIII	IX	X	$\Sigma Y-X$
W	7.9	9.2	-	5.1	2.0	-0.7	
C	8.0	9.4	8.8	5.2	1.8	-0.7	
E	8.8	10.4	9.8	6.2	2.1	-0.6	
<u>Максимум</u>	<u>9.7</u>	<u>11.4</u>	<u>10.6</u>	<u>7.4</u>	<u>2.6</u>	<u>-0.4</u>	<u>38.6</u>
Год	1963	1956	1972	1972	1963	1950	1972
Индекс	E	E+W	E	E	E(CW)	E	E
<u>Минимум</u>	<u>7.6</u>	<u>9.1</u>	<u>8.2</u>	<u>5.0</u>	<u>1.4</u>	<u>-1.2</u>	<u>32.0</u>
Год	1968	1963	1968	1966	1959	1957	1962
Индекс	C+E	C(W)	C(W)	EWC	C+W	W	E+W
Амплитуда	2.1	2.3	2.4	2.4	1.2	0.8	6.6

Т а б л и ц а 88

Радиационный баланс озер (в ккал./см².мес.)

Водоем	V	VI	VII	VIII	IX	X	Период
Оз. Кубенское	8.2	10.2	9.6	5.9	1.8	-0.6	1950-1974
Рыбинское водохр. ¹	8.4	10.4	9.5	6.6	2.6	0.3	1959-1966
Оз. Ладожское ²	10.0	12.0	11.4	6.4	2.4	-0.5	1957-1962
Оз. Онежское ³	8.9	10.7	10.2	5.5	1.9	-0.9	1948-1967

П р и м е ч а н и е. 1 - по наблюденным данным Е.А. Зайцевой (1965); 2 - по рассчитанным данным Н.П. Смирновой (1968); 3 - по рассчитанным данным К.А. Мокиевского (1973).

В табл. 88 дается сравнение полученных расчетных величин радиационного баланса оз. Кубенского с радиационным балансом крупных озер Северо-Запада европейской части СССР.

Радиационный баланс оз. Кубенского и Рыбинского водохранилища в период нагревания (май-июль) имеет довольно близкие величины, но в период охлаждения баланс Рыбинского водохранилища значительно превышает соответствующие величины для оз. Кубенского. Озера Ладожское и Онежское в период нагревания имеют значительно большие величины радиационного баланса, чем Кубенское. Поскольку радиационный баланс для всех четырех озер относится к разному периоду времени, то подобное сравнение может иметь только ориентировочный характер. Следующим этапом работы по изучению радиационного баланса озер Вологодской и юга Архангельской областей является расчет радиационного баланса озер Воже и Лача, в связи с чем к анализу многолетнего хода и сравнительно-му анализу радиационного баланса оз. Кубенского и близлежащих озер мы еще вернемся.

Изложенные выше расчеты радиационного баланса и составляющих его элементов и характеристика факторов, определяющих их величины, свидетельствуют о том, что основную роль в формировании радиационного баланса оз. Кубенского играет облачность, являющаяся достаточно четким показателем циркуляционных условий для каждого конкретного периода времени. На рис. 73 показаны величины суммарной радиации, радиационного баланса и облачности в отклонении от средних величин за 1950-1974 гг. для 1956 г. и 1972-1974 гг. Сравнение двух совершенно различных по циркуляционным условиям сезонов 1956 и 1972 г. четко иллюстрирует зависимость их радиационных характеристик от типа циркуля-

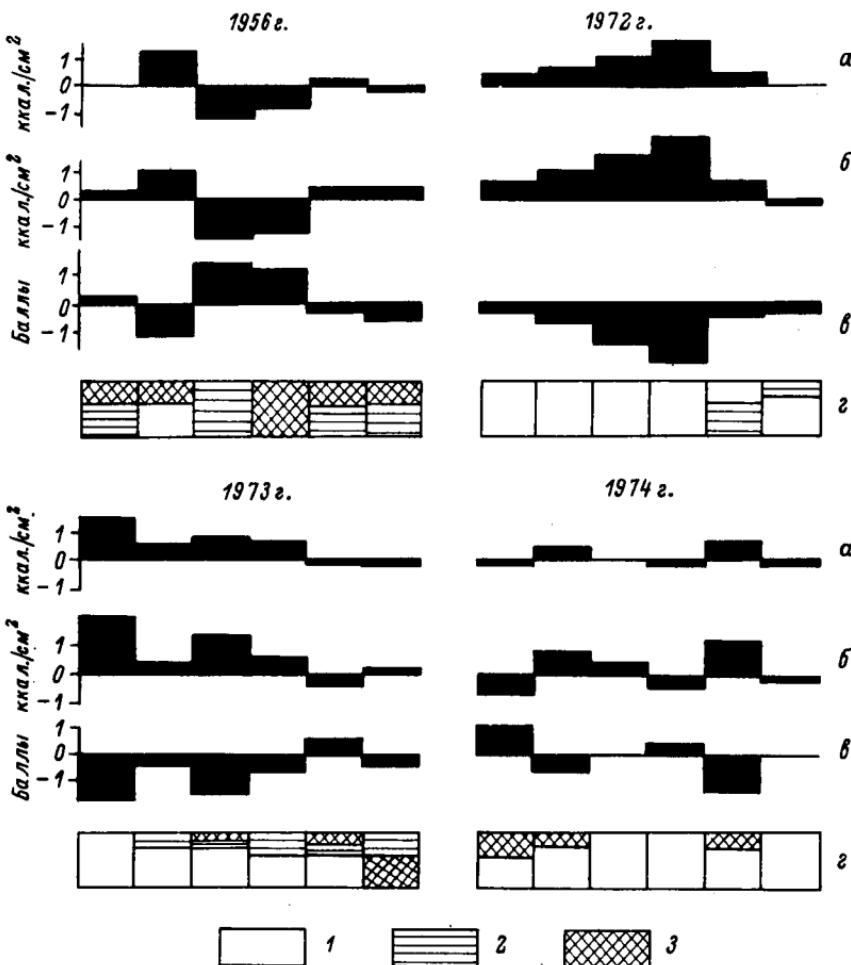


Рис. 73. Радиационный баланс (а), суммарная радиация (б) и облачность (в) при различных типах атмосферной циркуляции (г) за четыре расчетных года (в отклонениях от средней за 1950–1974 гг.).

1 – Е ; 2 – С ; 3 – В .

ционного процесса, соответствующего каждому месяцу и сезону в целом.

Таким образом, период 1950–1974 гг. является периодом значительных межгодовых контрастов в радиационных характеристиках. Преобладание за открытый период циркуляции типа Е обеспечивает высокие средние многолетние величины суммарной радиации и радиационного баланса, но усиление в отдельные сезоны циркуля-

ционных процессов типа *C* несколько снижает эту величину. Следует ожидать, что в случае преобладания процессов типа *W* или *C* средняя многолетняя величина суммарной радиации и радиационного баланса будет ниже.

5.2. Потери тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой

Физические свойства поверхности водоема и суши различны, что приводит к формированию над ними метеорологического режима с разными характеристиками. При непрерывном взаимодействии воздушных масс над водоемом и окружающей сушей неизбежно взаимное их влияние на характеристики метеорологического режима, в первую очередь на температуру и влажность воздуха. Степень этого влияния определяется, с одной стороны, морфологическими особенностями водоемов, с другой – гидрометеорологическими характеристиками воздуха над окружающей водоем сушей.

Задача настоящего раздела состоит в количественной оценке тепла, расходуемого поверхностью оз. Кубенского на испарение и турбулентный обмен с атмосферой, и определении закономерностей распределения этих величин в течение года и от года к году.

В основу расчета затрат тепла на испарение и турбулентный теплообмен положены известные гидрометеорологические формулы А.П. Браславского и З.А. Викулиной (1954) с уточненным коэффициентом по методике Технических указаний (1969):

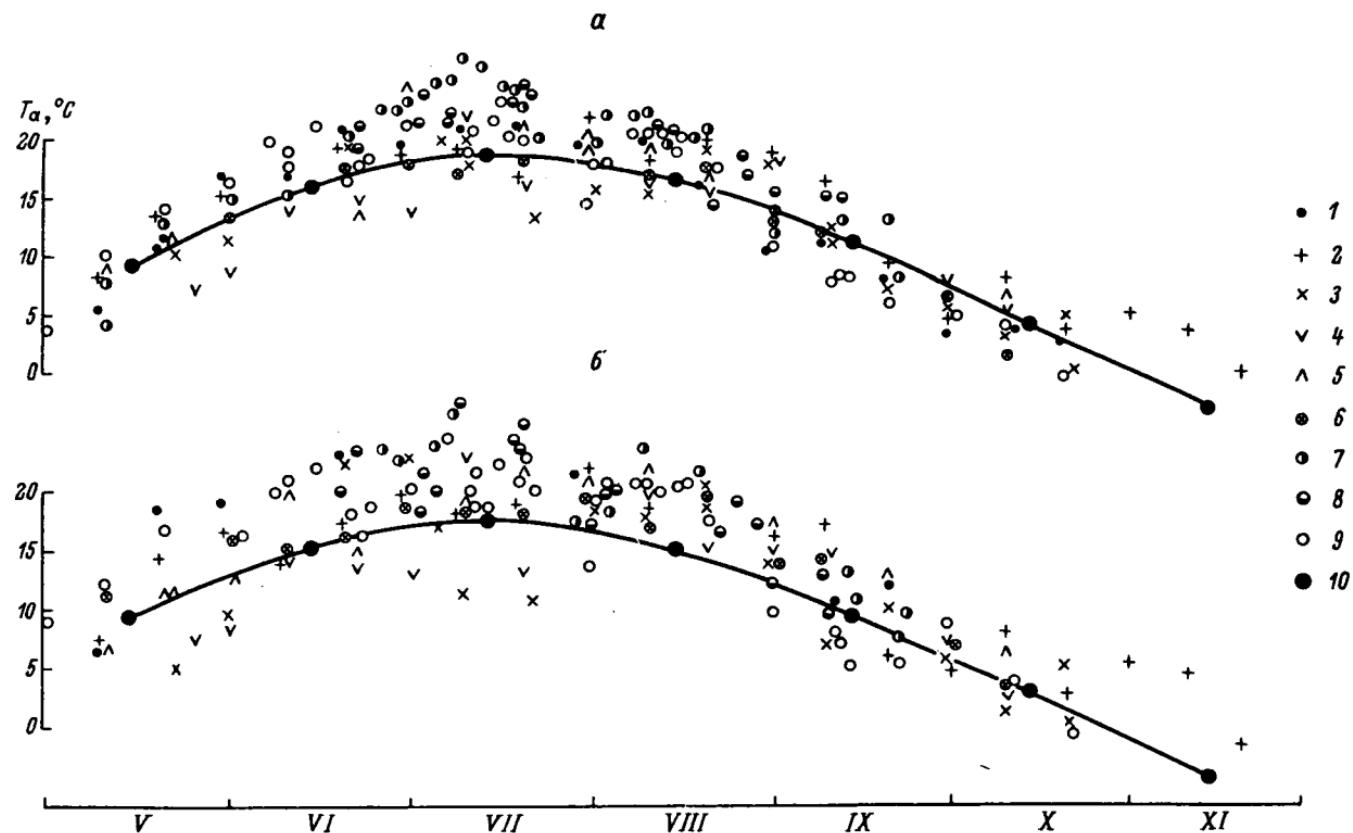
$$E = 0.14 \pi (\varrho_0 - \varrho_2) (1 + 0.72 u_2) \text{ мм/мес.};$$

$$LE = 595 - 0.565 T_0 \text{ кал./см}^2 \text{ на } 10 \text{ мм испарения};$$

$$P = 5.07 \pi (T_0 - T_2) (1 + 0.72 u_2) \text{ кал./см}^2 \cdot \text{мес.}$$

В этих формулах: E – испарение; LE – затраты тепла на испарение; P – турбулентный теплообмен; $T_0 - T_2$ – разность температуры поверхности воды и воздуха над водоемом на высоте 2 м, $^{\circ}\text{C}$; $\varrho_0 - \varrho_2$ – разность между максимальной упругостью водяного пара, определяемой по температуре поверхности воды, и абсолютной влажностью воздуха над водой на высоте 2 м, мб; u_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/сек.; π – число дней в месяце.

Перечисленные элементы приводного слоя определяют интенсивность и направление потоков тепла и влаги между поверхностью озера и атмосферой. Изменение их во времени над мелководными озерами обусловлено главным образом изменчивостью условий погоды в районе исследования (гл. 2, наст. изд.). Режимные гидрометеорологические наблюдения на больших озерах ограничены, что



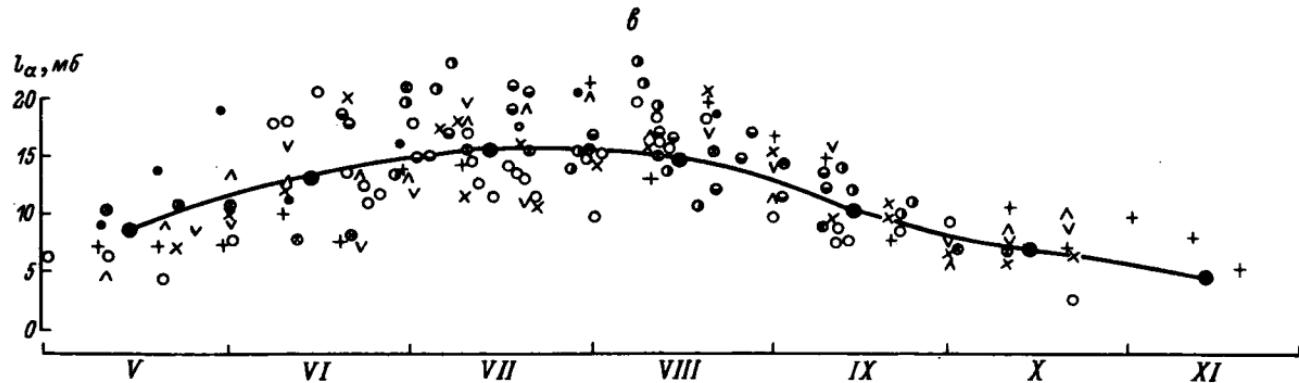


Рис. 74. Хронологические графики изменения температуры поверхности воды (а), температуры (б) и абсолютной влажности воздуха (в).

1 - 1966 г.; 2 - 1967 г.; 3 - 1968 г.; 4 - 1969 г.; 5 - 1970 г.; 6 - 1971 г.;
7 - 1972 г.; 8 - 1973 г.; 9 - 1974 г.; 10 - многолетние средние месячные, рассчитанные по методике ТУ.

объясняется трудностями их выполнения. Поэтому нередко, в зависимости от поставленной задачи, приходится прибегать к расчетным методам определения тех или иных характеристик, используя данные наблюдений на ближайших метеостанциях.

Непосредственных наблюдений над поверхностью оз. Кубенского мало. Периодические измерения на рейдовой вертикали, проводимые Вологодской ГМО раз в декаду, недостаточны для получения характеристики режима отдельных элементов. В нашем распоряжении были материалы рейдовой вертикали с 1961 г. по температуре поверхности воды озера (около 200 серий), а с 1966 г. на ней, кроме того, стали проводиться измерения температуры воздуха по сухому и смоченному термометрам. Количество измерений температуры и влажности воздуха составило свыше 100 серий. За период работ экспедиции в июне–сентябре 1972–1974 гг. выполнено свыше 300 серий измерений гидрометеорологических элементов по акватории озера и около 500 серий измерений на временных стационарах в районе о. Каменного и на водомерном посту д. Пески. По данным рейдовой вертикали и наблюдений в открытом озере, осредненным для дня, построены хронологические графики распределения указанных элементов в сезонном ходе за ряд лет. Разброс точек, характеризующих разные годы во все месяцы открытого периода, достаточно широк (рис. 74).

Расчет элементов приводного слоя

Для расчета температуры поверхности воды (T_0) и метеорологических элементов над поверхностью озера (T_2, e_2, u_2) был использован расчетный метод ГГИ, изложенный в Технических указаниях (1969). За опорную метеостанцию для оз. Кубенского была принята Вологда (Прилуки). При расчетах необходимо знание средней длины разгона воздушного потока (Z), под которой понимается среднее взвешенное расстояние по водному зеркалу водоема с учетом повторяемости направлений ветра. Эта величина определялась по двум системам прямоугольных сеток из параллельных профилей, ориентированных в одном случае с севера на юг и с запада на восток, в другом – с северо-запада на юго-восток и с северо-востока на юго-запад. Длина разгона на оз. Кубенском по указанным системам сеток существенно различается только для профилей, ориентированных с северо-запада на юго-восток. Вычисление проводилось для отдельных месяцев многолетнего периода и конкретного года. На оз. Кубенском Z от месяца к месяцу изменяется в пределах меньше 1 км (для конкретного года – в несколько больших – до 3.6 км, но среднее значение за период остается практически равным среднему многолетнему). Ввиду малых различий допустимо принять Z для всего периода постоянной и равной 12 км.

Таблица 89

Температура поверхности воды (T_0), температура (T_2) и влажность (e_2) воздуха, рассчитанные по методике ТУ, по оз. Кубенскому за многолетний период

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
$T_0, {}^{\circ}\text{C}$	1.0	9.8	16.4	18.8	16.9	11.3	4.7	-2.8
$T_2, {}^{\circ}\text{C}$	1.8	9.7	15.6	17.5	15.5	9.9	3.6	-4.1
$e_2, \text{мб}$	5.4	8.7	13.1	15.5	14.3	10.1	6.7	4.3
$T_0 - T_2, {}^{\circ}\text{C}$	-0.8	0.1	0.8	1.3	1.4	1.4	1.1	1.3
$e_0 - e_2, \text{мб}$	1.2	3.4	5.6	6.2	5.0	3.3	1.8	0.7

Величина Z была использована для расчета средних месячных значений температуры поверхности воды, температуры и абсолютной влажности над озером. Расчет производился последовательно от месяца к месяцу. Для последующих месяцев начальная температура воды принимается равной конечной температуре предшествующего месяца. Для апреля начальная температура поверхности условно принята равной $1 {}^{\circ}\text{C}$ (Несина, 1970). Обращает на себя внимание тот факт, что разница между температурами поверхности трех месяцев – июня-августа, с максимумом в июле, – очень мала и подобна разнице в температуре воздуха (табл. 89).

Поскольку оз. Кубенское мелководно, прогрев его водной массы идет интенсивно, и уже с мая в приводном слое воздуха устанавливаются равновесные (или близкие к ним) условия стратификации атмосферы. От августа к сентябрю происходит интенсивное понижение температуры поверхности воды, а средняя величина ее в октябре приближается к температуре наибольшей плотности.

Расчет средней температуры и абсолютной влажности воздуха над озером на высоте 2 м производился по формулам

$$T_2 = T'_2 + (T_0 - T'_2)M,$$

$$e_2 = e'_2 + (0.8 e_0 - e'_2)M,$$

где T_2 и e_2 – средние месячные величины температуры и влажности воздуха над водоемом, ${}^{\circ}\text{C}$ и мб; T'_2 и e'_2 – средние за расчетный интервал времени температура и абсолютная влажность воздуха, измеренные на метеостанции; T_0 – расчетная температура поверхности воды озера; e_0 – максимальная упругость водяного пара за этот же промежуток времени, определенная по T_0 ; M – коэффициент трансформации, учитывающий среднее изменение температуры и влажности воздуха в зависимости от размера водоема. Результаты расчета приведены в табл. 89.

Таблица 90

Потери тепла с поверхности Кубенского озера
на испарение (LE) и турбулентный обмен (P) с атмосферой
за многолетний период (в ккал./см².мес.)

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Сумма за IV-XI
LE	1.3	3.8	5.6	5.6	4.4	3.2	2.1	0.8	26.8
P	-0.5	0.1	0.5	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	4.1

Температура воздуха над озером интенсивно возрастает от апреля к маю и от мая к июню. В июне–августе многолетние месячные значения T_2 , высокие, максимум приходится на июль. В сентябре наблюдается значительное понижение температуры (на 5.6°, по средним многолетним данным). В ноябре температура воздуха над озером ниже нуля. Ход изменения абсолютной влажности над озером аналогичен ходу изменения температуры воздуха, но отличается более плавными переходами от месяца к месяцу. Разность температур поверхности воды и воздуха свидетельствует о преобладании в приводном слое озера в период с апреля по ноябрь равновесных условий стратификации.

Сравнение рассчитанных элементов приводного слоя озера с фактическими данными измерений (рис. 74) свидетельствует, с одной стороны, о правильности расчета, с другой – о репрезентативности показаний рейдовой вертикали и о возможности использования месячных величин рассчитанных температур поверхности воды и воздуха и абсолютной влажности для характеристики режима элементов приводного слоя и определения потерь тепла с поверхности озера на испарение и турбулентный обмен с атмосферой.

Направление потоков тепла и интенсивность обмена теплом и влагой поверхности озера с атмосферой при прочих равных условиях определяют знак и величина разности температур поверхности воды и воздуха и влажностей в приводном слое ($T_0 - T_2$ и $e_0 - e_2$). По рассчитанным элементам приводного слоя за многолетний период, эти разности (табл. 89) свидетельствуют о том, что турбулентный поток в апреле направлен к поверхности озера из атмосферы, в мае он ничтожно мал, а с июня по ноябрь включительно поверхность озера отдает тепло в атмосферу, величина которого невелика по сравнению с затратами тепла на испарение, определяемыми разностью влажностей.

T_0, T_2, e_2 , полученные с помощью методики ТУ, были использованы для расчета затрат тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой оз. Кубенского по гидрометеорологическим формулам. За исходные данные по скорости ветра приняты по-

Т а б л и ц а 91

Средние разности температур ($T_0 - T_2$) и влажностей ($e_0 - e_2$) по фактическим измерениям на оз. Кубенском

	У	VI	VII	VIII	IX	X
$T_0 - T_2$, °C	-1.5	-0.3	0.5	0.3	0.4	0.3
$e_0 - e_2$, мб	2.8	5.9	7.0	6.1	3.4	1.6
Число дней наблюдений	16	37	70	74	42	17
Число наблюдений	16	77	242	313	125	17

казания ст. Вологда без приведения их к высоте 2 м. Результаты расчета представлены в табл. 90. Как видно из таблицы, затраты тепла на испарение за апрель–ноябрь составили 26.8 ккал./см², на турбулентный теплообмен – 4.1 ккал./см².

Внутригодовое распределение потерь тепла с поверхности озера на испарение и обмен с атмосферой укладывается в рамки обычных закономерностей, установленных для мелководных водоемов умеренной зоны. В летний период затраты тепла на испарение распределяются довольно равномерно (максимум – в июне–июле), с сентября они значительно уменьшаются наряду с интенсивным охлаждением поверхности озера и всей водной массы.

Величина потерь тепла с поверхности за счет турбулентного обмена с атмосферой незначительна по сравнению с потерями на испарение в течение мая–сентября, и только в октябре–ноябре они становятся сравнимыми. За весь период потери тепла с поверхности на обмен с атмосферой составляют около 15% от величины затрат тепла на испарение. Незначительность месячных величин тепла, расходуемого поверхностью озера на обмен с атмосферой, вполне закономерна. Небольшая глубина озера способствует быстрому нагреванию весной водной толщи и установлению равновесных условий стратификации в приводном слое. Последние господствуют и в течение летне–осеннего периода. Понижение температуры воздуха ведет к быстрому охлаждению поверхности озера и всей водной толщи. Теплозапас водной массы мелководного озера быстро расходуется. Раннее и быстрое замерзание способствует уменьшению потерь тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой. В октябре суммарные потери ($LE + P$) с поверхности составляют около 3 ккал./см², а в ноябре они не превышают 2 ккал./см².

Для некоторого уточнения полученных потерь тепла на испарение и турбулентный теплообмен с атмосферой оз. Кубенского и расчета за конкретные годы были использованы все наблюдения на

Таблица 92

Поправки к температуре (1) и абсолютной влажности воздуха
(2) по ст. Коробово

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1, °C	-0.4	-0.2	+0.5	+0.9	+0.9	+0.8	+0.5	+0.6
2, мб	-0.3	+0.3	+0.7	+0.9	+0.7	+0.3	0.0	+0.1

озере над элементами приводного слоя на рейдовой вертикали Вологодской ГМО за период 1966–1973 гг., наблюдения Вологодско-Архангельской экспедиции Института озероведения АН СССР по акватории озера и на временном стационаре в районе с. Каменного. К сожалению, для мая и октября этих данных недостаточно. Материалы экспедиционных исследований относятся в основном к теплому периоду – июнь–сентябрь. Именно эти месяцы периода 1972–1974 гг. отличались повышенным температурным фоном, что могло отразиться на величине разности температур поверхность–воздух. Как видно из табл. 91, осредненные для месяца фактические разности температур поверхность–воздух и разности влажностей свидетельствуют о том, что в мае и июне поток тепла направлен к поверхности озера, в остальные месяцы – от нее; интенсивность турбулентного потока, кроме мая, невелика и несколько меньше по сравнению с рассчитанными данными (табл. 89). Следует обратить внимание на то, что изменчивость температуры воздуха над озером (и поверхности воды озера) в мае и июне значительна. Данных измерений по озеру недостаточно, наблюдения на рейдовой вертикали приурочены главным образом к 12–13 час. Однако, как показал анализ суточного хода элементов приводного слоя на большом мелководном оз. Ильмень (по оз. Кубенскому, к сожалению, таких данных нет), проведенный на основе данных многочисленных суточных станций (больше 70), выполненных через 2 часа в период 1958–1968 гг. на постоянной вертикали в центральной части озера и опубликованных в „Материалах наблюдений на озерах и водохранилищах“, эти элементы, измеренные в 12-часовой срок, по значению близки к средним суточным.

Температура поверхности оз. Кубенского, рассчитанная по методике ТУ за многолетний период, согласуется с температурой поверхности воды, полученной за период 1951–1973 гг. (разд. 5.4, наст. изд.). Наибольшие расхождения (1.2 и 0.9°, что составляет 14 и 5%) получены для мая и августа с разными знаками. Сумма же месячных температур за май–октябрь практически одинакова. Рассчитанные по методике Технических указаний (1969) температура и абсолютная влажность воздуха над поверхностью озера путем введения к ним месячных поправок приведены к показаниям метеостанции д. Коробово, принятой за опорную при экспедиционных исследованиях на озере в 1972–1974 гг. и в расчетах метеорологических элементов за полный цикл увлажненности (табл. 92).

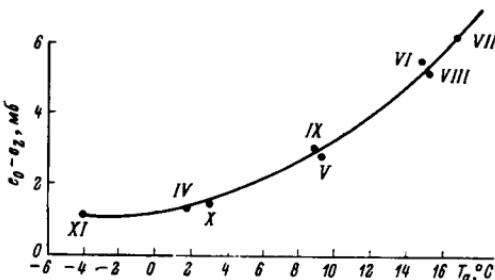


Рис. 75. Связь разности влажностей ($e_0 - e_2$) с температурой воздуха (T_0) по показаниям ст. Коробово за 1951-1973 гг.

Т а б л и ц а 93

Средние месячные разности температур ($T_0 - T_2$) и влажностей ($e_0 - e_2$) по оз. Кубенскому за многолетний период

	IY	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
$T_0 - T_2, {}^\circ\text{C}$	-0.7	-0.3	0.9	1.4	1.5	1.4	1.0	1.6
$e_0 - e_2, \text{мб}$	1.3	2.8	5.5	6.2	5.2	3.0	1.4	1.1

С введением поправок на температуру и абсолютную влажность воздуха (табл. 92) к показаниям ст. Коробово и на температуру поверхности воды оз. Кубенского (разд. 5.4, наст. изд.) были определены исходные параметры ($T_0 - T_2$) и ($e_0 - e_2$) для расчета ежемесячных затрат тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой за 1951-1973 гг. по вышеприведенным формулам.

Осредненные за период 1951-1973 гг. месячные разности влажностей ($e_0 - e_2$), определяющие испарение с поверхности озера (табл. 93), имеют криволинейную зависимость с температурой воздуха по ст. Коробово (рис. 75). Эта зависимость позволяет использовать температуру воздуха и упростить методику определения затрат тепла на испарение с оз. Кубенского.

Интенсивность обмена теплом и влагой поверхности озера с атмосферой определяется также силой ветра. Чем сильнее ветер, тем процесс обмена идет интенсивнее. Материалы синхронных наблюдений за ветром над водной поверхностью озера и метеостанцией показали, что различия в величине скорости существуют постоянно, независимо от сезона, и могут быть разного знака. На графиках связи между скоростью ветра над водой и опорной стан-

цией (Коробово) точки имеют значительный разброс. Уточнить скорость ветра над водной поверхностью озера на основе материалов исследований с лодок, не лишенных погрешностей, возникающих при производстве наблюдений над ветром, не представилось возможным. Исследователями экспериментально установлено, что при переходе воздушного потока с суши на водную поверхность его скорость увеличивается (Браславский и Викулина, 1954). Наибольший прирост скорости отмечается в прибрежной зоне водоема, далее он замедляется и на расстоянии нескольких сотен метров от берега почти прекращается. Известны и количественные зависимости изменения скорости ветра над водоемом от различных факторов (Тараканов, 1958; Шпак, 1958; Тимофеев, 1963; Зайцев и Тимофеев, 1967, и др.).

В расчетах потеря тепла с оз. Кубенского нами использована скорость ветра по ст. Коробово без приведения к уровню 2 м, поскольку увеличение скорости ветра над озером по сравнению с окружающей сушей в количественном выражении практически такое же, как если скорость ветра на высоте флюгера привести к высоте 2 м по логарифмическому закону изменения скорости ветра с высотой.

Скорость ветра в отличие от других метеорологических элементов не имеет ярко выраженного сезонного хода. Поэтому внутригодовое распределение характеристик обмена теплом и влагой поверхности озера с атмосферой будет определяться главным образом ходом разностей температур и влажностей в приводном слое.

В месяцы устойчивого ледостава (XII, I, II, III) испарением с поверхности озера, покрытого льдом и снегом, обычно принебрегают ввиду малой величины, а температуру поверхности условно принимают равной температуре воздуха. При допущении равенства температур поверхность–воздух теплообмен равен нулю. Однако результаты осреднения данных непосредственных наблюдений за 10 зим (1950–1960 гг.) для северного района ЕТС, выполненных в целях качественной оценки возможного испарения со снежного покрова, показали, что разность температуры поверхности снежного покрова и температуры воздуха составила в декабре -0.5° , январе -0.2 , феврале -1.0 и марте -0.9° (Копанев, 1967). Существование разницы температур в зимних условиях указывает на наличие тепло- и влагообмена между поверхностью и атмосферой. Указанные разности температур, по Копаневу, и были приняты нами в расчете зимних величин тепло- и влагообмена с оз. Кубенского. Температура и абсолютная влажность воздуха, скорость ветра для этих месяцев приняты по ст. Коробово. Результаты расчета приведены в табл. 94 и 95. Для анализа и сравнения с величинами, полученными по методике ТУ, приняты величины LE и R за период апрель–ноябрь. Именно они определяют годовую величину этих потерь. Средние суммарные затраты тепла на испарение за май–сентябрь 1951–1973 гг. на 7% ($1.8 \text{ ккал.}/\text{см}^2$) меньше, чем приведенные в табл. 90, а величина турбулентного теплообмена –

Таблица 94

16 1658

Затраты тепла на испарение (в мм/см²) с поверхности оз. Кубенского

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма за год
1951	-0.2	-0.1	0.2	0.5	4.9	4.5	4.3	3.8	3.9	1.5	1.4	0.1	24.8
1952	0.0	-0.2	0.0	1.0	2.2	3.7	4.6	4.3	2.3	2.0	1.6	-0.1	21.4
1953	-0.3	-0.2	0.6	0.7	3.5	5.4	3.4	3.4	3.3	1.0	0.9	0.0	21.7
1954	-0.3	-0.2	0.7	1.4	1.0	2.7	5.3	3.8	2.9	1.2	2.0	0.0	20.5
1955	-0.2	-0.2	-0.2	1.3	2.2	2.2	4.2	4.0	2.6	1.2	1.0	-0.2	17.9
1956	-0.6	-0.8	0.4	1.2	0.8	4.5	3.7	3.2	3.1	2.0	1.1	0.0	18.6
1957	-0.1	0.1	0.1	1.0	2.8	3.2	4.0	3.6	3.1	1.4	1.7	0.0	20.9
1958	-0.4	-0.2	0.2	1.3	1.3	4.5	6.8	4.1	3.6	1.5	1.7	-0.5	23.9
1959	-0.4	0.1	0.8	1.4	4.4	4.6	6.2	6.3	2.9	1.9	0.9	-0.3	28.8
1960	-0.6	0.2	0.1	1.7	4.8	6.2	6.9	5.9	2.7	2.0	0.6	0.0	30.5
1961	-0.7	-0.1	0.6	2.2	0.8	6.1	5.0	4.0	3.4	1.9	0.6	-0.2	23.6
1962	-0.3	0.0	0.3	1.1	3.7	5.8	4.9	4.4	2.9	1.0	1.1	-0.4	24.5
1963	-0.3	-0.2	-0.2	0.9	1.5	2.3	3.9	4.4	3.4	1.7	1.8	-0.4	18.8
1964	-0.9	-0.2	-0.1	1.0	1.4	6.0	5.6	4.6	2.2	1.0	0.9	-0.3	21.4
1965	-0.6	-0.3	-0.1	1.9	1.9	4.6	6.9	3.9	3.5	1.6	0.9	-0.1	24.1
1966	-0.4	-0.3	-0.1	0.8	2.6	7.6	6.2	5.8	2.4	1.4	1.6	0.0	27.6
1967	-0.2	0.0	1.1	0.4	3.6	5.4	6.8	4.9	2.8	1.5	1.0	-0.3	27.0
1968	-0.3	-0.1	0.7	2.5	4.9	5.8	6.2	3.8	2.6	2.4	0.8	-0.2	29.1
1969	-0.1	0.1	0.4	0.8	2.8	6.5	5.0	6.8	2.9	1.8	1.0	-0.5	27.5
1970	-0.4	-0.1	0.6	1.7	4.4	6.9	7.6	5.7	3.4	2.1	1.1	0.0	33.0
1971	-0.4	-0.3	-0.1	2.4	3.2	5.4	5.7	5.2	3.0	2.0	0.9	-0.4	26.6
1972	-0.5	-0.2	-0.1	0.9	2.7	6.1	9.8	5.6	2.8	1.5	0.6	0.4	29.6
1973	-0.5	-0.4	0.3	0.6	4.1	5.3	7.6	3.2	2.2	1.9	1.2	-0.6	24.9
1974	0.1	0.8	1.0	1.9	0.8	5.7	6.6	3.4	3.2	1.4	2.0	0.4	27.3
Среднее	-0.4	-0.2	0.3	1.2	2.9	5.0	5.7	4.6	2.9	1.6	1.1	-0.2	24.6

Таблица 95

Потери тепла на турбулентный обмен с атмосферой (в ккал./см²) с поверхности оз. Кубенского

Год	I	II	III	IV	V	V1	VI	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма за год
1951	-0.1	-0.6	-0.5	-2.0	1.9	0.2	0.8	0.1	1.3	0.7	1.3	-0.4	2.7
1952	-0.2	-0.7	-0.6	-0.4	-0.6	0.2	0.5	0.9	0.6	1.6	0.8	-0.3	1.8
1953	-0.1	-0.5	-0.8	-1.8	0.9	0.1	0.0	0.6	1.6	0.6	0.7	-0.3	1.0
1954	-0.1	-0.5	-0.6	0.1	-1.1	-0.5	1.0	0.5	1.1	0.3	2.2	-0.4	2.0
1955	-0.1	-0.5	-0.6	0.7	-0.2	-0.1	0.4	0.5	0.1	-0.5	1.0	-0.3	0.4
1956	-0.1	-0.5	-0.4	0.5	-1.5	-0.4	0.7	0.7	0.9	1.2	1.5	-0.3	2.3
1957	-0.1	-0.6	-0.5	-0.2	-0.4	0.5	0.2	0.4	1.0	-0.1	1.8	-0.4	1.6
1958	-0.1	-0.6	-0.5	0.0	-0.9	1.0	0.8	1.1	1.2	0.5	1.0	-0.2	3.3
1959	-0.1	-0.6	-0.5	-0.2	0.8	0.3	0.7	1.1	1.4	1.4	0.8	-0.3	4.8
1960	-0.1	-0.7	-0.6	0.6	0.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.5	0.9	-0.3	4.5
1961	-0.1	-0.7	-0.8	0.6	-1.4	0.4	1.3	1.0	1.4	0.9	0.9	-0.4	3.1
1962	-0.2	-0.7	-0.6	-1.1	0.5	1.8	1.0	1.3	0.9	0.6	0.5	-0.4	3.6
1963	-0.1	-0.5	-0.5	-0.2	-1.9	0.6	0.3	0.8	0.7	1.0	1.4	-0.4	1.2
1964	-0.2	-0.6	-0.5	-1.1	-0.4	0.3	0.6	0.9	0.8	0.1	1.3	-0.4	1.8
1965	-0.1	-0.5	-0.5	0.3	-0.2	0.3	1.8	0.8	1.1	0.5	1.4	-0.4	4.5
1966	-0.1	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	1.2	1.1	1.0	0.8	0.4	0.8	-0.4	2.8
1967	-0.1	-0.6	-0.7	-1.1	-0.1	0.8	1.3	0.8	1.0	-0.2	0.5	-0.3	1.3
1968	-0.1	-0.7	-0.8	-0.2	0.8	0.2	1.6	0.6	0.9	1.8	0.6	-0.4	4.3
1969	-0.1	-0.6	-0.6	-1.0	0.0	1.3	0.8	1.0	1.1	0.9	0.7	-0.3	3.2
1970	-0.1	-0.6	-0.6	-0.8	0.5	0.7	1.4	0.7	0.9	0.7	0.8	-0.3	3.3
1971	-0.2	-0.6	-0.6	0.0	-0.5	0.8	1.0	0.8	1.0	1.0	0.6	-0.3	3.0
1972	-0.1	-0.6	-0.6	-1.0	0.0	0.9	1.3	0.0	0.6	0.5	0.4	-0.4	1.0
1973	-0.2	-0.6	-0.5	-1.4	-0.2	0.3	0.8	0.1	1.0	0.9	1.1	-0.4	0.9
1974	-0.1	-0.7	-0.5	0.2	-1.1	1.0	1.7	1.1	0.4	0.3	1.3	-0.4	3.2
Среднее	-0.1	-0.6	-0.6	-0.4	-0.1	0.5	0.9	0.7	1.0	0.7	1.0	-0.3	2.7

Таблица 96

Коэффициенты изменчивости (числитель) и средние квадратические отклонения (знаменатель) затрат тепла на испарение (LE) и суммарных потерь тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой ($LE + P$) оз. Кубенского за многолетний период (1951–1973 гг.)

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
LE	0.48 0.5	0.45 1.2	0.28 1.4	0.28 1.6	0.25 1.1	0.16 0.5	0.24 0.4	0.34 0.7
$LE+P$	1.4 1.1	0.70 2.0	0.23 1.3	0.29 1.8	0.22 1.1	0.17 0.7	0.39 0.9	0.34 0.7

на 5% больше, что при малых абсолютных значениях ее составляет 0.2 ккал./см². Незначительные различия величин LE и P , рассчитанные за многолетний период разными способами, позволяют судить о правильности расчета этих элементов теплового режима для оз. Кубенского и о их стабильности для среднего года. Определение месячных величин LE и P за 23-летний период позволяет рассмотреть изменчивость этих составляющих в отдельные месяцы периода открытой воды и за период в целом.

Суммарные величины LE за апрель–ноябрь изменяются в пределах 18.8–32.8 ккал./см². Вариации месячных величин затрат тепла на испарение за расчетный период различны (табл. 96).

Поскольку потери тепла на испарение с поверхности озера являются определяющими, а величина турбулентного теплообмена невелика и часто различна по знаку, роль P показана лишь в суммарной величине месячных потерь тепла с поверхности озера. Изменчивость суммарных потерь тепла с поверхности оз. Кубенского за счет турбулентного теплообмена значительно увеличивается в апреле и мае, когда поток тепла направлен к поверхности водоема и его величина существенно изменяется по абсолютному значению.

Отношение сумм P / LE за период апрель–ноябрь в отдельные годы 23-летнего ряда изменяется в пределах 0.10–0.25. В отдельные месяцы периода открытой воды (май–октябрь) различия могут быть на порядок больше. Роль турбулентного теплообмена на мелководных озерах невелика (17% от суммы LE за период апрель–ноябрь) и существенно увеличивается осенью: от 33% в сентябре до 87% в ноябре (табл. 95).

Испарение лимитируется притоком тепла из атмосферы и его распределением в водоеме. Роль потерь тепла на испарение по сравнению с радиационным балансом и суммарной радиацией (разд.

Т а б л и ц а 97

Отношение средних месячных величин Р, LE и LE+P
к суммарной радиации (Q) и радиационному балансу (B)
оз. Кубенского за многолетний период (1951-1973 гг.)

	У	VI	VII	VIII	IX	X
P/LE	0.03	0.10	0.16	0.16	0.33	0.43
LE/Q	0.23	0.35	0.41	0.45	0.57	0.73
LE/B	0.34	0.49	0.59	0.75	1.61	2.66
LE+P/Q	0.23	0.38	0.48	0.53	0.76	1.04
LE+P/B	0.34	0.54	0.69	0.88	2.16	3.94

5.1, наст. изд.) возрастает для средних условий от мая к октябрю, соответственно от 34 до 266% и от 23 до 73%. Суммарные потери тепла с поверхности на испарение и турбулентный обмен в октябре практически равны суммарной радиации и почти в 4 раза превышают величину радиационного баланса.

Ниже приведены пределы изменения годовых потерь тепла (LE+P, ккал./см²) различной обеспеченности (в %) с поверхности оз. Кубенского:

%	ккал./см ²
5	36.0
10	34.5
20	32.0
30	30.5
40	29.0
50	27.5
60	26.5
70	25.0
80	23.0
90	20.5
95	19.0

Наибольшие потери тепла с поверхности озера за счет турбулентного обмена в период апрель-ноябрь относятся главным образом к холодным и очень холодным по термическим условиям месяцам (7 из 8), наоборот, наименьшие потери (или приток тепла к поверхности озера) характеризуют месяцы теплые или очень теплые (5 из 8). Максимальные потери на испарение приурочены в летнее время (июнь-август) к теплым и очень теплым месяцам, весной и

Т а б л и ц а 98

Суммарные потери тепла ($L E + P$, ккал./см²) с поверхности оз. Кубенского
в разные периоды

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма за год
1951- 1962 гг. (много- водная фаза)	-0.4	-0.7	-0.3	0.8	2.9	4.8	5.6	5.0	4.1	2.3	2.3	-0.4	26.0
1963- 1973 гг. (мало- водная фаза)	-0.5	-0.8	-0.3	0.7	2.8	6.3	7.6	5.6	3.7	2.4	2.0	-0.6	28.9
1951- 1973 гг. (полный цикл увлажненности)	-0.5	-0.8	-0.3	0.8	2.8	5.5	6.6	5.3	3.9	2.3	2.1	-0.5	27.2

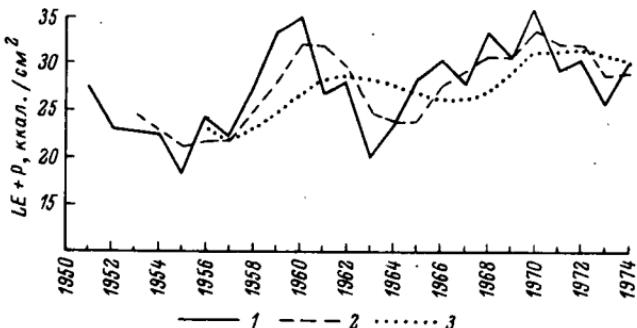


Рис. 76. Ход годовых сумм затрат тепла на испарение и турбулентный обмен с атмосферой за 1951–1973 гг.

1 – ежегодные; 2 – 3-летние скользящие; 3 – 6-летние скользящие.

осенью чаще к нормальным и холодным. Условия формирования наименьших затрат тепла на испарение с поверхности мелководного озера в период открытой воды определить, вероятно, довольно сложно. Чаще всего это происходит в месяцы, по термическим условиям сдвинутые от нормальных в сторону холодных. Годовые величины потерь тепла с поверхности озера определяются особенностями погодных условий периода открытой воды в целом.

В разные фазы водности в годовых величинах потери тепла на испарение составляют 89–91% от суммарных ($LE + P$), внутри года за теплый период расходуется 98–101%. Годовые потери тепла с поверхности озера ($LE + P$) в многоводную фазу на 5% меньше, в маловодную – наоборот, на 5% больше средних за 1951–1973 гг. (табл. 98).

За теплый период (IV–X) многоводной фазы $LE + P$ на 6% меньше, в маловодную – на 7% больше средних за весь период. В холодный период разных фаз водности суммарные потери на $LE + P$ при их малых абсолютных значениях в %-ном отношении различаются существенно. Внутри года разных фаз водности наблюдается перераспределение потерь тепла.

На рис. 76 приведены колебания суммарных потерь тепла с поверхности озера на испарение и турбулентный обмен с атмосферой от года к году за расчетный период. Отчетливо видны два хорошо выраженных минимума – в 1955 и 1963 гг. и два максимума – в 1960 и 1970 гг. суммарных теплопотерь, причем второй минимум и второй максимум были более высокие по своему значению в сравнении с первыми. Сглаженные кривые (3- и 6-летние) показывают наличие двух циклов в колебаниях потерь тепла с поверхности озера и тенденцию к их увеличению в последние годы.

Особенности метеорологических условий в годы работы экспедиции на озере (1972–1974 гг.), в холодном 1956 г. и много-

Т а б л и ц а 99

Суммарные потери тепла ($LE + P$ ккал./см²)
с поверхности озера в разные периоды года
по отношению к средним (в %) многолетним
(1951-1973 гг.)

Год	IV-V		VI-VIII		IX-X	
	ккал./см ²	%	ккал./см ²	%	ккал./см ²	%
1956	4.6	128	12.4	71	9.8	118
1966	2.6	72	22.9	131	7.4	89
1972	2.6	72	23.7	136	6.4	77
1973	3.1	86	17.3	100	8.3	100
1974	1.8	50	19.5	112	8.6	104

водном 1966 г. отразились на величине тепло- и влагообмена поверхности озера с атмосферой (табл. 99).

В летние месяцы (VI-VIII) периода экспедиционных исследований потери тепла с поверхности озера были равны средним или на 12-36% больше. Весной и осенью 1956 г. они были больше средних. В соответствующие периоды других названных лет потери тепла были в основном равны или меньше средних (холодная весна 1974 г.). В отдельные месяцы отклонения суммарных потерь тепла от среднего могут быть незначительными. Так, в летние месяцы 1972 г. (июнь, июль, август) потери тепла с озера были соответственно на 27, 68,6% больше средних за эти месяцы.

5.3. Т е п л о в о й п р и т о к и с т о к

При исследованиях теплового обмена крупных озер с окружающей средой тепло, приносимое в водоем реками и теряемое им со стоком, несмотря на незначительность этой величины, рядом авторов рассматривается в качестве элемента теплового баланса (Верболов и др., 1965; Смирнова, 1968; Тихомиров, 1973). Однако в водоемах замедленного водообмена влияние теплового притока и стока на происходящие в них процессы носит локальный характер. Это отмечала Е.Г. Архипова, выделившая зону влияния теплового стока р. Волги на режим прибрежной зоны Каспийского моря (Архипова, 1957). У озер, характеризующихся большим водообменом,

эти составляющие теплового баланса приобретают более существенное значение. По интенсивности водообмена, имеющего показатель, равный 4, Кубенское озеро может быть отнесено к аккумулятивно-транзитной группе водоемов (Богословский, 1971), у которой смена вод происходит в течение одного сезона, что указывает на значительное влияние поверхностного притока на происходящие в них гидрологические, в том числе тепловые, процессы.

Исходными данными для расчета теплового притока и стока оз. Кубенского послужили сведения о средней месячной температуре воды рек района, опубликованные в Гидрологических ежегодниках (Гидрологические ежегодники, 1957-1974), а также материалы о среднем месячном водном притоке и стоке озера с учетом невязок водного баланса (разд. 3.3, наст. изд.). Расчеты производились для периода открытой воды (май-октябрь) по средним многолетним данным наблюдений за 1951-1973 гг., для характерных холодного и теплого года и за время работы Вологодско-Архангельской экспедиции. Определение теплового притока и стока было сделано по известной формуле, которая, будучи преобразованной для месячных данных, имеет следующий вид (Богословский, 1960);

$$Q_{\text{нр., см.}} = \frac{100 W t \rho c}{F},$$

где Q - количество тепла, ккал./см² в месяц; W - средний месячный приток (сток) воды, км³; t - средняя месячная температура воды, °С; ρ и c - плотность и удельная теплоемкость, равные единице; F - площадь зеркала озера на конец месяца, км².

Озеро Кубенское принимает более 30 притоков, среди которых самый многоводный - р. Кубена, на долю которой приходится 77% от общего объема поступающих в него речных вод. Второй по величине приток озера - р. Уфтуяга, годовой сток которой почти в 10 раз меньше, чем у главной реки. На этих реках, начиная с 1951 г. ведутся систематические наблюдения за температурным режимом в двух пунктах - на р. Кубене (д. Кубинская) и на р. Уфтуяге (д. Маланьевская), отражающих условия формирования теплового притока с 38% площади озерного водосбора. Сведения о температуре воды на других притоках отсутствуют. Сток из озера происходит по Сухоне, имеющей многолетний ряд наблюдений за температурой воды на посту в д. Рабаньга, расположенной в 33 км от истока реки.

Поскольку анализ метеорологических условий и особенностей формирования поверхностного притока в озеро за рассматриваемый период представлен в соответствующих разделах (гл. 2; разд. 3.1, наст. изд.), при исследовании теплового притока и стока озера основное внимание было уделено термическому режиму рек.

Тепловой приток

Количество тепла, приносимого в озеро реками, зависит от двух факторов – величины водного притока и температуры речной воды. По многолетним данным, с мая по октябрь в оз. Кубенское поступает $2,60 \text{ км}^3$ воды, более половины притока приходится на май – $1,48 \text{ км}^3$, или 57% общей величины. В многоводном 1966 г. майский приток достигал $2,72 \text{ км}^3$, в маловодном 1973 г. снизился до $0,43 \text{ км}^3$. Распределение водного притока между остальными месяцами находится в пределах от 5,8 до 12,8% всего объема за период открытой воды.

По термическому режиму реки района, согласно классификации Е.М. Соколовой, относятся ко второму типу, для которого характерно отрицательное значение разности температур вода–воздух в весенние месяцы и положительное в летне–осенний период (Соколова, 1951). Внутригодовые изменения температуры воды в реках района в основном повторяют ход температуры воздуха с некоторым отставанием во времени. На основных притоках озера средняя температура воды в мае на $1,6\text{--}1,7^\circ$ ниже температуры воздуха. В июне речная вода уже теплее воздуха на $1,1\text{--}1,3^\circ$, в июле эта разница достигает наибольших значений – $1,8\text{--}2,1^\circ$, менее всего она в октябре – $0,7^\circ$. В среднем за период с мая по октябрь температура воды на р. Кубене (д. Кубинская) составляет $12,5^\circ$, на р. Уфтуге (д. Маланьевская) – $12,0^\circ$ при средней температуре воздуха на побережье оз. Кубенского (ст. Коробово) $11,7^\circ$ (табл. 100).

Температурный режим р. Кубены, определяющей величину теплового притока в озеро, в основном отражает изменения температуры поверхностных вод, поступающих с водосбора. Влиянием неизученных малых притоков, температура воды которых принята по аналогии более низкой, чем на крупных, в силу их незначительной доли в питании озера можно пренебречь.

После вскрытия р. Кубены в конце апреля прогревание ее вод происходит довольно интенсивно. Средняя температура воды в мае, когда на реке проходит пик половодья, составляет $7,6^\circ$. В мае 1963 г. средняя температура воды достигала наибольшего значения – $12,3^\circ$, в третьей декаде вода нагрелась до $17,5^\circ$. Средняя месячная температура воздуха в это время была равна $14,5^\circ$, что на $5,3^\circ$ выше ее многолетнего значения. Сочетание высокой температуры воздуха с крайне низким половодьем, составившим менее 50% его среднего объема, обусловило раннее прогревание рек по сравнению с озером. В результате чего вода в р. Кубене единственный раз за весь 23-летний период оказалась почти на 2° теплее озерной.

Самая низкая майская температура на р. Кубене – $3,6^\circ$ – отмечалась в 1961 г., хотя температура воздуха была близка к средней многолетней характеристике. По сравнению с маевыми температурами воды в июне возрастает более чем в 2 раза, достигая

Т а б л и ц а 100

Средняя месячная температура воды оз. Кубенского и основных рек района
за многолетний период (1951-1973 гг.)

Объект	У	УІ	УІІ	УІІІ	ІХ	Х	Средняя за У-Х
Поверхностный слой озера	8.6	16.3	19.2	17.8	11.1	4.5	12.9
Водная масса озера Кубена (д. Кубинская)	8.2	15.3	18.4	17.4	11.1	4.7	12.5
Уфтуяга (д. Маланьевская)	7.6	16.1	19.4	17.4	10.5	3.8	12.6
Сухона (д. Рабаньга)	7.5	15.9	18.6	16.2	9.9	4.1	12.0
	8.7	16.6	19.6	17.9	11.2	4.2	13.0

в среднем 19.4° . Исключительно теплой была вода в р. Кубене в июле 1972 г.; в среднем за месяц она составила 23.9° , за вторую декаду — 26.2° , при температуре воздуха 20.9° (на 3.7° выше нормы). Второй максимум средней месячной температуры речной воды, равный 22.2° , отмечен в июле 1954 г. В конце июля начинается охлаждение рек. Температура воды в р. Кубене в августе снижается до 17.4° , в сентябре до 10.5° . Крайние значения температуры воды в сентябре составили 5.0° (третья декада месяца 1956 г.) и 18.8° (первая декада месяца 1963 г.). В первой декаде ноября температура в реке переходит через 0.2° , начинается ледостав.

Аналогичный ход температуры характерен для р. Уфтуяги, хотя на протяжении всего периода с мая по октябрь вода в ней холоднее, чем в р. Кубене. Средняя разница составляет 0.5° , наибольшая, равная 1.2° , относится к августу.

Взаимодействие водной массы озера и поверхностного притока проявляется не только в количественном соотношении тепла, накапливаемого озером из атмосферы и принесенного реками, но и в температурных отличиях озера и его притоков. Сравнение, проведенное по данным о средней месячной температуре воды р. Кубены (д. Кубинская) и средней поверхностной температуре в оз. Кубенском, рассчитанной А.И. Тихомировым и А.Н. Егоровым (разд. 5.4, наст. изд.), позволило выявить некоторые особенности в их режиме. Согласно средним многолетним температурным характеристикам, вода р. Кубены большую часть времени незначительно холоднее озерной (или близка ей по температуре), за исключением июля, когда она теплее ее (табл. 100). Наибольшие температурные различия между рекой и озером имеют место в мае, в период полу-

воды. Если по средним многолетним данным температура воды р. Кубены в этом месяце на 1° ниже озерной, то в отдельные годы эта разница возрастает до 2.5 - 3° . Наибольшая из них была отмечена весной 1968 г., когда в озеро, нагретое до 10.3° , поступала речная вода с температурой 7.3° . Исключение составляло упоминавшийся выше случай, относящийся к маю 1963 г., когда прогревание рек произошло значительно раньше озера.

В самом теплом месяце – июле – температура речной воды фактически равна озерной, хотя в отдельные годы она на 1.5° выше или ниже ее, что зависит как от особенностей тепловых процессов в озере, так и от общих метеорологических условий и водности рек. В осенние месяцы благодаря более интенсивному охлаждению температура воды в реках преимущественно ниже, чем в озере, иногда на 1 - 1.5 и даже 2.2° . Так, например, в октябре 1961 г. она была соответственно 6.3 и 8.5° .

В силу того, что р. Уфтуга по сравнению с р. Кубеной является более холодной, отличия ее вод от озерных несколько заметнее, хотя сами отклонения хода температуры остаются аналогичными таковым у главного притока.

При определении теплового притока в оз. Кубенское использовались материалы о среднем месячном стоке р. Кубены, приведенном к устью, и суммарном стоке рек с остальной части водосбора. Данные по температуре воды брались по двум пунктам: для р. Кубены – по посту в д. Кубинская, для остальных притоков озера – по р. Уфтуге (д. Маланьевская). Распространение температурных сведений по р. Уфтуге на неизученные реки обусловлено предположением, что малые притоки (по аналогии с р. Ёмой, имеющей подобный водосбор) большую часть открытого периода холоднее р. Кубены.

Тепло, приносимое реками, в силу большого водообмена оз. Кубенского довольно велико. Будучи отнесенными к единице площади, за период с мая по октябрь в сумме оно составляет 4.90 ккал./ см^2 . В многоводном 1966 г. тепловой приток в озеро возрос до 5.07 ккал./ см^2 , в маловодном 1973 г. снизился до 1.58 ккал./ см^2 . В холодном 1956 г., когда температура воды на реках района была на 1.5° ниже многолетнего значения, суммарный тепловой приток составил 4.41 ккал./ см^2 , что связано с несколько повышенным водным стоком мая и значительными летне-осенними паводками. В один из самых теплых лет – 1972 г. – поступление тепла с речными водами сократилось до 2.72 ккал./ см^2 в силу малых величин водного притока в озеро (табл. 101).

Распределение теплового притока по месяцам имеет свои особенности. Несмотря на то что величина теплового притока зависит от двух факторов – водности рек и температуры воды в них, его внутрисезонный ход определяется в основном колебаниями водного притока в оз. Кубенское.

Наибольший тепловой приток, равный 1.87 ккал./ см^2 , приходится на май, когда на реках района отмечается пик весеннего по-

Т а б л и ц а 101

Тепловой приток и сток оз. Кубенского за многолетний период и отдельные годы (в ккал./см².мес.)

Период	Элементы	У	УІ	УП	УІІІ	ІХ	Х	Сумма за У-Х
1951- 1973 гг.	Приток	1.87	0.96	0.71	0.65	0.42	0.29	4.90
	Сток	1.25	2.07	1.97	1.83	1.02	0.39	8.53
	Разность	+0.62	-1.11	-1.26	-1.18	-0.60	-0.10	-3.63
1956 г. (холод- ный)	Приток	1.72	0.31	0.33	1.32	0.41	0.32	4.41
	Сток	0.69	1.07	1.46	1.90	1.00	0.47	6.59
	Разность	+1.03	-0.76	-1.13	-0.58	-0.59	-0.15	-2.18
1972 г. (теплый)	Приток	1.43	0.66	0.24	0.20	0.12	0.07	2.72
	Сток	0.81	1.40	1.76	1.64	0.79	0.30	6.70
	Разность	+0.62	-0.74	-1.52	-1.44	-0.67	-0.23	-3.98
1973 г.	Приток	0.85	0.27	0.16	0.13	0.11	0.06	1.58
	Сток	0.75	1.26	1.20	1.03	0.46	0.13	4.58
	Разность	+0.10	-0.99	-1.04	-0.90	-0.35	-0.07	-3.25
1974 г.	Приток	1.16	1.01	0.24	0.30	0.15	0.13	2.99
	Сток	0.54	2.63	1.31	1.06	0.76	0.42	6.72
	Разность	+0.62	-1.61	-1.07	-0.76	-0.61	-0.29	-3.73

ловодья, хотя вода в реках в это время еще относительно холодная. В мае 1966 г., являющимся одним из самых многоводных при температуре речной воды, равной средней многолетней, тепловой приток достигал 2.38 ккал./см². Самым низким, вероятно, можно считать тепловой приток в мае 1973 г., равный 0.85 ккал./см². Несмотря на то что температура воды в реках достигала 11.6° (на 4° выше средней месячной нормы), тепловой приток оказался мал из-за исключительно небольшого водного притока в мае, приходящегося на спад половодья.

В июне поступление тепла с речной водой по сравнению с маем сокращается почти в два раза. В июле, когда температура речной воды достигает наибольших значений, тепловой приток снижается до 0.70 ккал./см². Начиная с августа вследствие охлаждения речной воды тепловой приток в озеро значительно уменьшается, не- сколько возрастаая в период высоких дождевых паводков, особенно сентябрьских, проходящих при температуре воды в реках около 10°. В сентябре 1961 г. он составил около 1 ккал./см², почти в два раза превысив характерную для этого месяца величину теплового притока. Сравнивая между собой количества тепла, приносимого

реками в различные сезоны, можно заметить, что на весенние месяцы (май–июнь) приходится более половины от их общей величины. В летнее время тепловой приток уменьшается в 2 раза по сравнению с весной, а осенью – в два раза по сравнению с летом. Влияние поступающего в озеро речного тепла оказывается наибольшим в период весеннего нагревания, когда на него долю приходится около 23% от общего радиационного баланса, рассчитанного выше (разд. 5.1, наст. изд.). Следует отметить, что как в водном, так и в тепловом притоке в оз. Кубенское около 77% приходится на р. Кубену.

Тепловой сток

Потери тепла со стоком из оз. Кубенского зависят от водного и температурного режима самого водоема. В силу естественного (озерного) и искусственного регулирования внутрисезонное распределение стока воды из озера в период открытой воды происходит довольно равномерно. При общем объеме стока за время с мая по октябрь, равном 3.21 км^3 , на май приходится 28.8%, на июнь – 21.5%, на остальные месяцы – по 11–15% общей величины. Существующее регулирование водного режима озера ставит его тепловой сток, в отличие от теплового притока, в большую зависимость от температурного состояния самих озерных вод. Температура воды в верховьях р. Сухоны (д. Рабаньга) по сравнению с реками Кубеной и Уфтугой имеет более высокие значения, что является результатом отепляющего воздействия самого озера. В среднем за период открытой воды она на 0.5° выше, чем на р. Кубене, и на 1° выше, чем на р. Уфтуге (табл. 100). В мае благодаря более раннему по сравнению с реками прогреванию озера температура воды р. Сухоны на 1° выше, чем у его главного притока.

В 1973 г. сотрудниками Ленинградского института союзводканалпроект проведены термические исследования в южной части оз. Кубенского. Сравнение полученных ими данных по средней декадной температуре воды в истоке р. Сухоны за период с мая по октябрь с показаниями поста в д. Рабаньга, расположенным от него в 33 км, показывает, что, несмотря на некоторые расхождения в температуре за отдельные декады, в большинстве случаев и в среднем за период характерно совпадение показаний обоих пунктов наблюдений.

Материалы по термическому режиму оз. Кубенского, полученные в результате его исследования в 1972–1974 гг. (разд. 5.5, наст. изд.), дают основание считать, что температурный режим верховьев р. Сухоны в основном отражает тепловые процессы, происходящие в озере. По средним многолетним данным, разница в температуре поверхности воды оз. Кубенского и верховьев р. Сухоны (д. Рабаньга) составила за отдельные месяцы периода откры-

той воды от 0.1 до 0.4° (табл. 100). Несколько иначе выглядит соотношение между температурой воды р. Сухоны и температурой всей водной массы озера: в июне и июле сухонская вода на 1.2-1.3° теплее озерной, в остальные месяцы разница составляет 0.1-0.5°. Сравнение температурного хода воды по месяцам в верховьях р. Сухоны, в озерной водной массе и поверхностных слоях озера позволяет предполагать, что тепловой сток из озера формируется за счет верхних горизонтов воды (табл. 100).

Тепловой сток из оз. Кубенского в среднем за 23-летний расчетный период составил 8.53 ккал./см², в многоводном 1966 г. его величина достигала 11.48 ккал./см², в холодном 1956 г. упала до 6.59 ккал./см², а в маловодном, но теплом, 1973 г. равнялась 4.83 ккал./см². Распределение теплового стока по месяцам и сезонам носит иной характер, чем у теплового притока. Если поступление речного тепла в озеро достигает максимальных значений в мае, то время наибольшего теплового стока сдвигается на конец весны-лето. С увеличением стока из озера, обусловленным его естественным и искусственным регулированием, возрастают и потери тепла. Судя по многолетним данным, тепловой сток в июне почти в два раза превышает майскую величину потерь, оставаясь затем почти неизменным в течение всего лета (табл. 101). В отдельные годы значительный тепловой сток может приходиться на конец лета в связи с дождевыми паводками. Так, например, в 1956 г. тепловой сток в августе достигал 1.90 ккал./см², значительно превысив сток предшествующих месяцев. Вероятно, наибольшим месячным тепловым сток был в июне 1966 г., когда достигал 3.86 ккал./см². Эта величина была обусловлена двумя причинами: водным стоком, почти в 2 раза превышающим многолетнее значение, и сравнительно высокой температурой воды. Исключительно большой водный сток июня 1955 г. приходился на время, когда температура воды р. Сухоны была крайне низкой, что и сказалось на уменьшении теплового стока из озера. По мере дальнейшей сработки озера потери тепла со стоком сокращаются и достигают в октябре наименьшего значения, равного 0.39 ккал./см².

Непосредственные многолетние наблюдения за температурой воды и стоком на посту в д. Рабаньга, замыкающем весь водо-сборный бассейн оз. Кубенского, позволяют с большей достоверностью (не прибегая к аналогии) оценить тепловой сток из озера и проследить его колебания от года к году. Расчеты, проведенные для открытого периода озера по данным 23-летнего ряда наблюдений, показали, что суммарная величина потерь тепла озером со стоком воды меняется довольно значительно – от 4.83 ккал./см² (1973 г.) до 12.84 ккал./см² (1955 г.). По гидрологическим условиям год с низким тепловым стоком характеризовался средней температурой воды р. Сухоны, близкой к многолетней, но имел малую водность. Год с наибольшими потерями тепла со стоком отличался наибольшим водным стоком из озера, почти в 1.7 раза

превысившим его многолетнее значение, при температуре воды, почти равной многолетней.

Соотношение теплового притока и стока оз. Кубенского не остается постоянным. Рассматривая эти два элемента теплового баланса озера отдельно от остальных его составляющих, можно отметить, что в течение почти всего периода открытой воды озеро больше теряет тепла со стоком р. Сухоны, чем получает его с поверхностными водами. Однако сама разность — тепловой приток минус тепловой сток — сравнительно невелика (табл. 101). В среднем за многолетний период превышение теплового стока над тепловым притоком равно 3.63 ккал./см^2 , в многоводном 1966 г. достигало 6.40 ккал./см^2 , причем только в июне эта разность составляла 2.80 ккал./см^2 .

Метеорологические и гидрологические условия в годы работы Вологодско-Архангельской экспедиции привели к сокращению теплового притока и стока из оз. Кубенского, оказавшихся на 40–70% меньше средних многолетних величин. По температуре воздуха за период открытой воды (гл. 2, наст. изд.) к числу теплых относился 1972 г., сравнительно холодным был 1973 г., а 1974 г. — близким к норме. Температура воды в реках во все три года превышала средние многолетние значения. Особенно высокой она была в р. Кубене летом 1972 г. и весной 1973 г.: в отдельные месяцы превосходила на $3\text{--}4^\circ$ многолетние показатели. Температурные отличия более теплой в летнее время речной воды от озерной в прибрежной зоне наиболее резко проявились в августе 1973 г., когда эта разница достигла в среднем за месяц 2.8° . Во время наибольшего водного притока, приходящегося на май, температура воды в р. Кубене обычно ниже озерной. В мае 1972 г. речная вода была холоднее на 1.3° , а в мае 1974 г. — всего лишь на 0.4° , зато в мае 1973 г. она была на 0.8° теплее, чем в озере. Несмотря на то что температура воды притоков характеризовалась повышенными значениями, маловодность летне-осенней межени всех трех лет работы экспедиции обусловила уменьшение тепла,носимого реками в озеро и соответственно теряемого им со стоком по р. Сухоне.

Тепловой приток в озеро в 1972 г. составлял 2.72 ккал./см^2 , что почти в 2 раза меньше многолетнего значения, в 1974 г. он был равен 2.99 ккал./см^2 , в самом маловодном за 23-летний период 1973 г. снизился до 1.58 ккал./см^2 (табл. 101). Распределение речного тепла по месяцам имело свои особенности, связанные со значительным преобладанием поверхностного притока в весенние месяцы и резким сокращением притока воды в остальные сезоны. В результате характерного для маловодных лет повышения доли половодья в годовом притоке количество тепла, поступившего в озеро в мае 1972 и 1973 г. составило более 50% от всей величины за период открытой воды соответствующих лет, в то время как в среднем за многолетний период на май приходится около 38% теплового притока. Весной 1974 г. тепловой приток в озеро посту-

пал более равномерно. Несмотря на то что температура воды в р. Кубене в мае была довольно низкой (3.7°), дружное половодье вызвало значительный приток речной воды. Снижение его в июне как бы компенсировалось повышением температуры воды в реке на 1.0° против многолетнего ее значения. Хотя абсолютные величины теплового притока были невелики, в течение мая и июня озеро получило более 70% от всего тепла, поступившего с речными водами в этом году за период открытой воды.

В соответствии с водным и тепловым притоком 1972–1974 гг. ниже средней многолетней величины оказался и тепловой сток из озера (табл. 101). Его внутрисезонное распределение было близким средним многолетним характеристикам. Исключением явился июнь 1974 г., отличавшийся повышенным тепловым стоком как по абсолютному значению, достигавшему 2.63 ккал./см^2 , так и по отношению к остальным месяцам. Тепловой сток этого месяца составил 39% от общего стока из озера при среднем показателе, равном 24%.

Сравнение теплового притока и стока за 1972–1974 гг. с многолетними данными показало, что если поступление тепла с речными водами в последние годы снизилось на 40–70%, то потери его со стоком уменьшились всего лишь на 20%. Относительно небольшое сокращение теплового стока можно объяснить тем, что ослабление водного стока, обусловленное маловодностью указанных лет, сопровождалось значительным прогреванием водной массы озера, благодаря чему температура воды во многие месяцы была выше средней. Несмотря на то что тепловой приток и сток были значительно меньше многолетних величин, их разность, равная $3.5\text{--}4.0 \text{ ккал./см}^2$, оказалась близка среднему значению.

Имеющиеся в литературе данные по тепловому балансу крупнейших озер европейской части СССР – Ладожскому и Онежскому – дают возможность сравнить степень влияния теплового притока и стока на термический режим озер с различным водообменом (Смирнова, 1968; Веселова, 1968; Кириллова, 1973). Тепло, приносимое реками в озера, у которых поверхностный приток в 14, как у Ладожского, и в 18 раз, как у Онежского, меньше объема их водной массы, может оказывать влияние в узко ограниченном районе; роль стока в затратах тепла также невелика (табл. 102). В озере, где водный приток в 4 раза превышает объем водной массы, каким является Кубенское, влияние рек в приходе и расходе тепла значительно возрастает. Если для озер с малым водообменом тепловым притоком и стоком можно пренебречь, то при расчетах теплового баланса оз. Кубенского учет этих составляющих необходим.

Т а б л и ц а 102

Радиационный баланс (B), тепловой приток (T_{np}) и тепловой сток (T_{ct}) озер с различным водообменом (в $\text{kcal}/\text{см}^2$)

	У	VI	VII	VIII	IX	X	Сумма за У-Х
Онежское (1948-1967 гг.)							
B	8.9	10.7	10.1	5.4	1.9	-0.9	36.1
T_{np}	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	1.3
T_{ct}	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	1.2
Ладожское (1957-1962 гг.)							
B	10.0	12.0	11.4	6.4	2.4	-0.5	41.7
T_{np}	0.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.2	2.9
T_{ct}	0.3	0.6	0.8	0.8	0.5	0.3	3.3
Кубенское (1951-1973 гг.)							
B	8.2	10.2	9.6	6.0	1.8	-0.6	35.2
T_{np}	1.9	1.0	0.7	0.6	0.4	0.3	4.9
T_{ct}	1.3	2.1	2.0	1.8	1.0	0.4	8.5

5.4. Т е р м и ч е с к и й р е ж и м и т е п л о з а п а с ы

Впервые наблюдения над температурой воды оз. Кубенского были организованы в 1936 г. на постах с. Кубенское, д. Пески и д. Коробово. С 1941 г. данные о температуре воды публикуются в Гидрологических ежегодниках.

Первые сведения о термическом режиме оз. Кубенского появились в работе Р.А. Филенко (1966). Более подробные данные о термическом режиме северных озер (Лача, Воже, Кубенское, Кенозеро, Сол-озеро и др.) приведены в монографии „Ресурсы поверхностных вод СССР“ (1972). Однако до настоящего времени термический режим оз. Кубенского был изучен недостаточно. Материалы многолетних наблюдений Сев. УГМС над температурой воды оз. Кубенского, не подкрепленные данными регулярных термосъемок, не позволяли выяснить характер связи температуры воды у берега с температурой воды в открытой части водоема. Отсутствовали и сведения о термическом режиме донных отложений озера.

Для освещения термического режима оз. Кубенского использовались материалы ГМС и данные полевых исследований Вологодско-Архангельской экспедиции Института озероведения АН СССР, включающие наблюдения над температурой воды, температурой донных отложений и некоторыми метеорологическими элементами: температурой воздуха, скоростью ветра, облачностью.

Как указывалось выше, наблюдения Сев. УГМС над температурой воды оз. Кубенского были начаты в 1936 г. Однако на посту д. Пески в 1938-1940, 1945-1947 и в 1949 гг. они не проводились, а на посту с. Кубенское постоянно велись только до 1957 г. В отличие от вышеуказанных постов наблюдения на посту д. Коробово проводились ежегодно с 1941 г. С 1961 г. в дополнение к наблюдениям на посту д. Коробово Сев. УГМС в открытый период ежегодно проводят наблюдения на рейдовой вертикали над температурой воды. Пост д. Коробово расположен на юго-западном берегу озера и совмещен с метеостанцией того же названия. Данные по температуре воды, собранные на указанном посту, наиболее репрезентативны. Они полнее, чем данные поста д. Пески, отражают температуру поверхности воды и водной массы озера.

Температура воды и донных отложений оз. Кубенского в период работы Вологодско-Архангельской экспедиции с 1972 по 1974 г. измерялась на термических станциях рядом с буями судового хода (фарватера), положение которых не менялось за годы работы экспедиции. Наблюдения над температурой воды велись на 0.1-0.2 м от поверхности, на горизонтах один метр и у дна. Измерения температуры донных отложений производились через 25-50 см. В большинстве случаев их удавалось провести до глубины 3 м от поверхности дна, а иногда и до 6-7 м.

Помимо измерений температуры воды и донных отложений на указанных станциях, в августе-сентябре 1972 г. и в июне-сентябре 1973 г. на актинометрическом посту экспедиции около о. Каменного проводились наблюдения над солнечной радиацией, метеорологическими элементами и температурой воды. Последняя изменилась на горизонтах 0.1, 1.0, 2.0 м и у дна. Исследования проводились с судна, стоявшего на якоре в 1 км к юго-западу от указанного острова. Измерения температуры воды на актинометрическом посту проводились четыре раза в сутки: в 9⁰⁰, 11⁰⁰, 17⁰⁰, 20⁰⁰. В августе 1972 г. один раз в сутки проводились измерения температуры донных отложений на постоянной вертикали в 200 м от судна.

Измерения температуры поверхности воды производились родниковыми, а измерения температуры воды по глубине — глубководными термометрами с точностью отсчета 0.1⁰. Для детального выяснения характера распределения температуры воды по поверхности озера в августе 1972 г. был использован прибор автоматической записи температуры воды на ходу судна.

Температура донных отложений измерялась при помощи датчиков сопротивления. Датчик представлял собой теплоизоляционную катушку с намотанной на нее медной проволокой сечением 0.05 мм^2 . Катушка с проволокой заключалась в латунный чехол, поверхность которого воспринимала температуру окружающей среды. Для уменьшения тепловой инерции датчика пространство между намотанной проволокой и внутренней поверхностью латунного чехла заполнялось трансформаторным маслом. Изменение величины сопротивления проволоки в зависимости от температуры регистрировалось мостом сопротивления типа Р-333. Показания, снятые с этого прибора, переводились по тарировочной таблице в температуру. Тепловая инерция такого датчика находилась в пределах 5–7 мин. Датчики монтировались на металлической штанге, которая по мере заглубления ее в грунт наращивалась за счет свинчивающихся труб. Глубины на станциях измерялись диском Секки, подвешенным на металлическом тросе сечением 3 мм.

За годы работы экспедиции на оз. Кубенском было сделано около 300 термических станций с измерением на них температуры воды и донных отложений, причем 8 из них – со льда: одна – в марте 1972 г., три – в марте 1973 г., одна – в конце апреля 1974 г. и три – в конце марта 1975 г. Кроме того, на гидрологической вертикали актинометрического поста проведено около 250 измерений температуры воды и 20 измерений температуры донных отложений.

Термический режим озера обусловлен физико-географическими условиями, морфологическими особенностями озерной котловины, объемом и свойствами водной массы и характеризуется сезонными изменениями как температуры воды, так и донных отложений. Ход и интенсивность изменения температуры воды и донных отложений меняются в течение года и носят циклический характер.

Рассмотрим термический режим оз. Кубенского с того момента, когда его тепловой баланс приобретает устойчиво положительное значение. Этот момент соответствует наступлению гидрологической весны и характеризуется годовым минимальным теплозапасом озера, складывающимся из теплозапаса воды (W_B) и донных отложений (W_T). Наступление гидрологической весны можно определить по окончанию нарастания толщины льда (Тихомиров, 1966, 1973). Уменьшение толщины льда на проточных озерах – показатель увеличения интенсивности поступления солнечной лучистой энергии на поверхность водоема, способной изменить суточный тепловой баланс до устойчиво положительного значения. Для того чтобы определить, когда без учета поступления талых вод оз. Кубенское получит положительное значение теплового баланса, используем данные табл. 103. Они показывают, что в среднем с первой декады апреля толщина льда оз. Кубенского убывает. Так как таяние льда начинается несколько раньше, чем можно заметить убыль его толщины, то, вероятно, в среднем начало срока, когда тепловой баланс этого озера мог бы стать положительным без

Таблица 103

Толщина льда (в см) оз. Кубенского по ст. Коробово
за март-апрель 1951-1971 гг.

Толщина льда	Март							Апрель						
	5	10	15	20	25	31		5	10	15	20	25	30	
	66	66	67	68	69	70	70	69	68	64	61	56		

учета поступления в водоем талых вод, можно отнести к середине первой декады апреля. В отдельные годы этот срок может приходиться на конец марта или на вторую декаду апреля.

На оз. Кубенском ледяной покров, как правило, бывает ровным. К весне лед становится многослойным вследствие выхода воды на его поверхность при прогибе под тяжестью снега. Образующийся наслуз иногда составляет около одной трети общей мощности ледяного покрова. Толщина снега на льду составляет в среднем 20-40 см. Продолжительность ледостава - в среднем 150-180 дней. Обычно в конце марта уровень озера снижается до годового минимума и к началу апреля увеличивается на несколько сантиметров. В это время иногда температура воздуха приобретает положительные значения. Постепенно появляются первые признаки разрушения льда: при таянии снега поверхность льда темнеет и образуются закраины. При снижении уровня воды лед оседает на дно и поэтому ранней весной прибрежья озера большей частью заняты льдом, лежащим непосредственно на грунте. Если воспользоваться расчетом положения уровня за многолетний период на первое число каждого месяца (разд. 3.4, наст. изд.), то можно примерно вычислить среднюю площадь льда, лежащего на дне озера к началу апреля.

Для этого примем за дату наступления устойчивого ледостава первое декабря. В среднем за многолетний период в начале декабря уровень озера на 158 см выше нуля графика поста д. Коробово и на 89 см выше такового на первое апреля, когда в среднем толщина льда составляет 70 см (табл. 103). Снижение уровня от первого декабря к первому апреля (69 см) составляет осушку озера за указанный срок, наблюдаемую при обследовании озера ранней весной. Используя морфометрические данные (разд. 3.4, наст. изд.), получим, что к 1 апреля площадь озера, занятая водой, составит 70% от площади водоема на 1 декабря, 21% занято льдом, лежащим на дне, и 9% составляет осушка озера от зимы к весне. На первое апреля площадь льда, лежащего на дне, достигает 80 км^2 при площади озера по нижней кромке льда 262 км^2 .

Поскольку часть теплозапасов оз. Кубенского приходится на его донные отложения, то необходимо иметь представление об их составе. Дно озера в основном сложено мелкоалевритовыми илами, а в прибрежной зоне – песками, местами значительно заиленными.

Определение теплофизических характеристик донных отложений озера нашей программой исследований не предусматривалось. Однако общее распределение донных отложений по озеру и их состав, а также содержание в них органического вещества изучалось А.А. Курочкиной (1974). Содержание органического вещества в донных отложениях определяется путем установления потери веса при прокаливании образцов. Процентное содержание органического вещества в донных отложениях позволяет с определенной точностью судить о их теплоемкости (Бакастов, 1966). В свою очередь, зная теплоемкость и температуру донных отложений, можно определить их теплозапас и роль в теловом балансе озера.

Большая часть озера (218 км^2) занята донными отложениями, в которых содержание органического вещества не более 5%. От 5 до 8% органического вещества содержится в донных отложениях на площади 42 км^2 , от 8 до 10% – на 91 км^2 и более 10% – на площади 66 км^2 озера. Судя по данным С.С. Бакастова (1966), теплоемкость донных отложений оз. Кубенского находится в пределах от 0.66 до 0.85 кал./см³.град. Средневзвешенное по площади дна озера значение теплоемкости грунтов получилось равным 0.70 кал./см³.град. и использовалось нами для расчета теплозапаса теплоактивного слоя донных отложений этого водоема.

Под теплоактивным слоем донных отложений озера понимается слой некоторой мощности, ниже которого годовое изменение температуры не оказывает существенного влияния на теплозапас водоема. Если эту формулировку отнести к максимальному теплозапасу водной массы мелкого озера и допустить, что точность определения теплозапаса не превышает 4%, как и для крупных глубоких озер (Тихомиров, 1973), то для оз. Кубенского можно приблизительно определить тот слой донных отложений, где годовое изменение температуры, а поэтому и изменение теплозапаса этого слоя, будет ниже точности определения теплозапаса водной массы в открытый период. На оз. Кубенском теплозапас водной массы является наибольшим в июле и составляет около 6.5 ккал./см². Четыре процента от этого теплозапаса составят 260 кал./см². Следовательно, при теплоемкости донных отложений озера 0.7 кал./см³ метровый слой ила должен изменить свою температуру на 3.7°, чтобы его теплозапас изменился на вышеуказанную величину. Исходя из полученной температуры можно определить слой донных отложений оз. Кубенского, который является наиболее активным в отношении аккумуляции тепла. По наблюденным и рассчитанным данным на нижней границе трехметрового слоя донных отложений, максимальная годовая амплитуда температуры составляет не более 3.3°. Следовательно, слой донных отложений мощностью в

3 м на оз. Кубенском может быть принят за теплоактивный слой. Поэтому исследования термического режима донных отложений оз. Кубенского в основном проводились в 3-метровой толще и расчеты теплозапаса грунтов озера были также отнесены к этому слою.

Возможно, что полученное изменение температуры донных отложений на горизонте 3 м от поверхности дна оз. Кубенского за год оказалось несколько ниже потому, что температурный максимум на этом горизонте наступает в октябре, когда наблюдений над температурой донных отложений не производилось. По данным С.Н. Тачалова (1966), на Рыбинском водохранилище годовая амплитуда изменения температуры на глубине 5 м составляет 5° . Подобное изменение температуры на глубине 5 м в донных отложениях либо завышено, либо остается предположить, что температура грунтов может в значительной мере варьировать на одних и тех же горизонтах в разных водоемах одинаковых климатических зон, схожих по термическому режиму водных масс. Так, например, на оз. Великом Калининской области, по данным Л.Ф. Форш (1968), годовая амплитуда температуры грунта на горизонте 5 м равна 1.7° и на горизонте 3 м составляет 3.1° .

В настоящее время термический режим донных отложений озер и водохранилищ еще недостаточно изучен. Технические средства измерения их температуры и методики наблюдения несовершенны и мало разработаны. Поэтому некоторые результаты исследований могут быть еще недостаточно надежными. Отсутствие данных о теплофизических параметрах и фильтрующих свойствах донных отложений создает дополнительные трудности для определения возможных изменений температуры донных отложений на различных горизонтах в течение года. Необходимо подчеркнуть, что в основном изменение температуры донных отложений озер и водохранилищ происходит за счет передачи им тепла от воды в весенне-летний периоды и, наоборот, от дна в воду в осенне-зимний периоды. Так как поток тепла из недр земли составляет около 40 кал./см 2 в год (по данным Фролова, ВСЕГИНГЕО, 1973 г.), им можно пре-небречь.

Рассмотрим температурные данные, относящиеся к водной массе и донным отложениям оз. Кубенского, полученные в конце марта 1973 и 1975 гг., а также в конце апреля 1974 г.

В марте 1973 г. по продольной оси озера были выполнены три станции (рис. 77). От р. Порозовицы к истоку р. Сухоны толщина льда уменьшалась с 60 до 40 см. Как будет показано ниже, сток р. Сухоны в течение ледоставного периода захватывает теплую придонную воду и вследствие этого препятствует нарастанию толщины льда по направлению к истоку этой реки. Слой снега на ст. 4 достигал 18 см, на ст. 6 – 27 см и на ст. 13 – 6 см. Он активно препятствовал проникновению солнечного тепла в воду и охлаждению воды в ночное время. В процессе исследований, которые проводились в конце марта, отепляющее воздействие донных отложений улавливалось по температуре воды во всем слое и даже

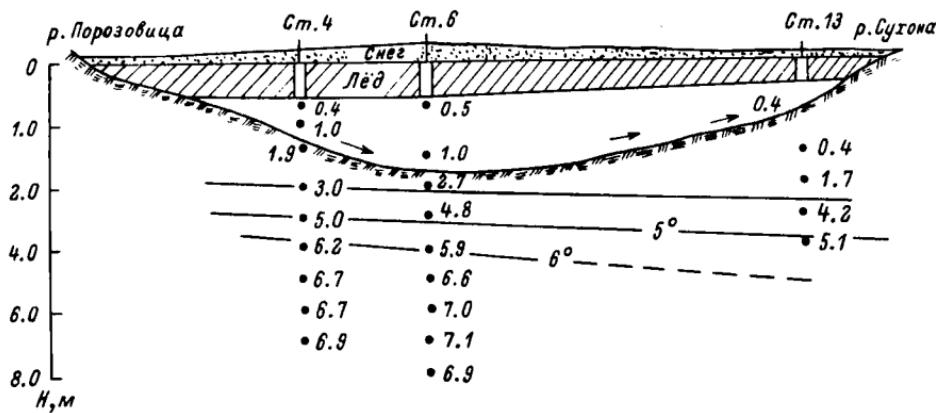


Рис. 77. Распределение температуры воды и донных отложений на продольном разрезе озера 27 III 1973 г.

Стрелками показано направление движения придонных вод.

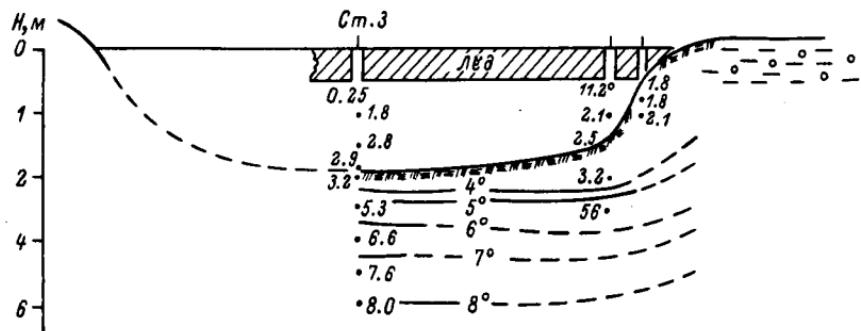


Рис. 78. Распределение температуры воды и донных отложений на поперечном разрезе озера 20 III 1975 г.

около нижней кромки льда, где она составляла $0.2\text{--}0.4^{\circ}\text{C}$. Однако тепловой поток от дна был значительно истощен, так как в течение зимы часть тепла, полученного водой от донных отложений, была израсходована на теплообмен с атмосферой благодаря теплопроводности льда, а большая часть вынесена со стоком.

Средняя толщина льда, по наблюденным данным (на ст. 2, 3 и 16), 27 марта 1973 г. равнялась 0.53 м при уровне воды 62 см над нулем графика поста д. Коробово. Без учета толщины льда средняя глубина озера в это время составляла 1.05 м. При средней температуре воды 0.6°C теплозапас водной массы озера составлял 63 кал./см². В это же время средняя температура 3-метрового слоя донных отложений составляла 3.9°C , а теплозапас

Т а б л и ц а 104

Суммы отрицательных средних месячных температур воздуха по ст. Коробово (ΣT_a^0), температура (T_b^0) и теплозапас (W_b) водной массы, температура теплоактивного слоя (T_f^0) и теплозапас (W_f) донных отложений оз. Кубенского весной 1973-1975 гг.

	27 III 1973 г.	28 IV 1974 г.	20 III 1975 г.
ΣT_a^0 , °C	-28.5	-28.2	-20.7
T_b^0 , °C	0.6	0.6	1.3
W_b , кал./см ²	63	74	143
W_f , кал./см ²	819	756	924
T_f^0 , °C	3.9	3.6	4.4

этого же слоя - 819 кал./см², т.е. в 13 больше, чем теплозапас воды.

В марте 1975 г. были получены данные по температуре воды и донных отложений в районе поста д. Коробово на поперечном разрезе. Судя по сумме отрицательных средних месячных температур воздуха, зима 1974-1975 гг. была более теплой, чем зима 1972-1973 гг. (табл. 104). Следовательно, степень охлаждения воды и донных отложений, а значит и их теплозапас, зависит от суровости зимы и погодных условий. Из данных наблюдений за 20 марта 1975 г. и данных, полученных (на ст. 3 и ст. 16) 27 марта 1973 г., было установлено, что средняя температура воды в марте 1975 г. при средней глубине озера в это время 1.10 м (без учета толщины льда) была 1.3°, что в два раза выше, чем 27 марта 1973 г. Средняя температура теплоактивного слоя донных отложений в марте 1975 г. на 0.5° превышала среднюю температуру донных отложений в марте 1973 г. (табл. 104). Теплозапас водной массы озера на дату исследований составил 143 кал./см², грунта - 924 кал./см². Теплозапас грунта превосходил теплозапас воды только в 6 раз против 13 в 1973 г. Сумма теплозапаса воды и донных отложений 20 марта 1975 г. была выше таковой 27 марта 1973 г. на 12%. Обращает на себя внимание тот факт, что 28 апреля 1974 г. на ст. 4, принятой за опорную для всего озера, значения температуры воды и донных отложений, а следовательно и теплозапасов, оказались ниже соответствующих данных, полученных в марте 1973 и 1975 гг.. В этот день толщина льда на ст. 4 достигала 0.60 см, средняя температура воды равнялась 0.6°, как и в марте 1973 г., а температура

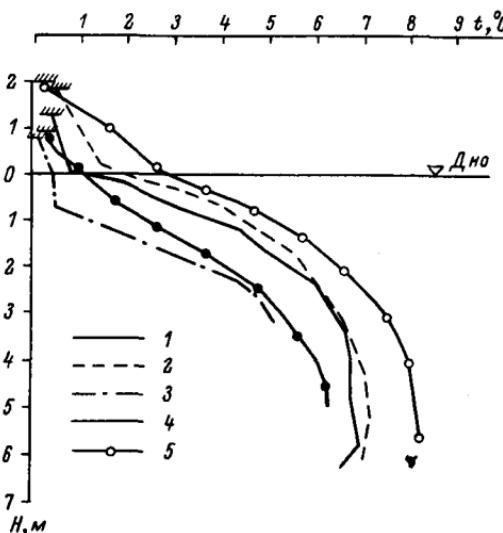


Рис. 79. Вертикальное распределение температуры воды и донных отложений озера в конце ледоставного периода разных лет.

27 III 1973 г.: 1 - ст. 1, 2 - ст. 10, 3 - ст. 13, 4 - ст. 2;
5 - 20 III 1975 г.

донных отложений в среднем составила 3.6° . Теплозапас воды при средней глубине озера 1.23 м равнялся 74 кал./см^2 , а донных отложений - 756 кал./см^2 . Теплозапас донных отложений был в 10 раз выше теплозапаса воды. Общая сумма теплозапаса озера равнялась 830 кал./см^2 и составляла 77% от такового 20 марта 1975 г. и 94% - от 27 марта 1973 г.

Прежде чем сделать какие-либо выводы из приведенных выше данных, проследим за вертикальным распределением температуры воды и донных отложений в конце ледоставного периода (рис. 79). Температуры воды у нижней кромки льда ($0.2-0.4^{\circ}$) увеличиваются на первом метре до $0.7-1.1^{\circ}$ и у дна достигают $0.4-1.8^{\circ}$ в зависимости от глубины озера. Что касается температуры донных отложений, то в результате анализа собранных материалов на оз. Кубенском, а также на озерах Воже и Лача (Тихомиров, 1974; Егоров, 1975) было установлено, что в конце марта - начале апреля наибольшая стратификация температуры в донных отложениях наблюдается в слое $0.8-1.0$ м от поверхности дна. На глубоководных станциях температурные градиенты достигают $2.5-2.9^{\circ}$ на первом метре, $1.2-1.8^{\circ}$ - на втором и 0.3° - на третьем. Максимальная температура донных отложений на озере обнаруживается на горизонте 4-5 м ниже дна в зависимости от глубины озера. На станциях 2 и 3 (рис. 79) на глубине 5-6 м в донных отложе-

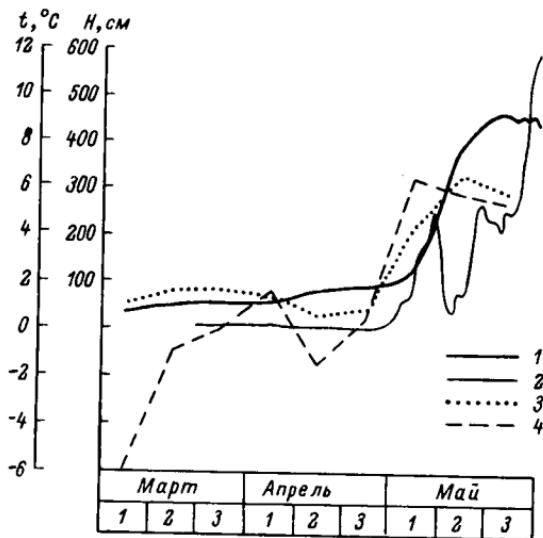


Рис. 80. Сопоставление гидрометеорологических элементов по озеру и р. Сухоне весной 1974 г.

1 – уровень воды озера по данным в/п Коробово; 2 – средняя суточная температура воды по данным в/п Коробово; 3 – средняя декадная температура воды р. Сухоны по данным в/п Рабаньга; 4 – средняя декадная температура воздуха по данным метеостанции Коробово.

ниях отмечается существование мезотермического максимума в 6.9–7.1 ${}^{\circ}\text{C}$. Вероятно, его положение по отношению к поверхности дна также меняется в зависимости от глубины озера.

На рис. 79 температурные кривые 2 и 5 относятся к ст. 3. Кривая 2 изображена по данным измерений температуры воды и грунтов от 27 марта 1973 г., а кривая 5 – по наблюдениям от 20 марта 1975 г. Из сравнения этих двух кривых видно, что распределение температуры в донных отложениях год от года проходит идентично, с небольшими отклонениями в зависимости от сложившихся условий охлаждения озера в зимний период и времени наблюдения. Судя по характеру кривых 5, 2 и 4, чем позже весной от марта к апрелю проведены измерения температуры воды и донных отложений в озере, тем ниже значения этих температур (рис. 79). Однако хорошо известно, что прогрев воды весной начинается еще подо льдом, и, значит, в этом вывиде есть неувязка. Для объяснения ее были изучены условия весеннего наполнения озера.

Т а б л и ц а 105

Даты перехода температуры воды оз. Кубенского
через 4° и конца ледоставного периода
по ст. Коробово

Год	Переход температуры воды через 4°	Конец ледоставного периода
1961	13 IV	12 V
1962	28 IV	28 V
1963	1 V	-
1964	2 V	2 V
1965	9 V	5 V
1966	1 V	22 IV
1967	2 V	30 IV
1968	30 IV	25 V
1969	8 V	9 V
1970	28 IV	30 IV
1971	7 V	5 V
1972	13 V	-
1973	30 IV	30 V
1974	18 V	18 V
Среднее	4 V	3 V

Прежде всего они показывают, что к первому апреля 1973 и 1974 гг. сумма отрицательных температур воздуха, по данным метеостанции Коробово, составила соответственно 28,5 и 28,2° (табл. 104). Следовательно, условия охлаждения оз. Кубенского в зиму 1972-1973 и 1973-1974 гг. были одинаковыми. Поэтому распределение температуры воды и донных отложений от 27 марта 1973 г. можно рассматривать как исходное для 27 марта 1974 г. (рис. 79, кривые 1-3).

Ежегодно в конце марта оз. Кубенское начинает наполняться талыми водами и его уровень становится выше на несколько сантиметров в конце указанного месяца. Так было и в 1974 г. Общий ход уровня, температуры воды и воздуха весной указанного года

приводится на рис. 80. С 15 до 26 марта уровень оз. Кубенского повысился на три сантиметра, а в последующие дни рос еще более заметно (рис. 80, кривая 1). В марте талая вода, поступая в озеро, интенсивно вытесняет теплую воду его придонного слоя. Поэтому сток воды из озера в это время в основном происходит за счет теплой придонной воды, поступающей в р. Сухону (рис. 80, кривая 3). Замещая теплую воду в озере, талая вода вызывает понижение температуры донных отложений и несколько снижает общий теплозапас озера, несмотря на рост уровня. Это понижение температуры воды подо льдом в апреле в итоге начинает сказываться и на температуре воды р. Сухоны (рис. 80, кривая 3). Начало поступления талой воды приходится на март, т.е. раньше чем суточная температура воздуха приблизится к нулевому значению (рис. 80, кривая 4). Оттепели, перемежающиеся с холодной погодой, оказывают влияние на количество поступающей талой воды в озеро, но ее поступление неизменно растет от дня ко дню. К тому времени, когда температура воды, по данным поста д. Коробово (рис. 80, кривая 2), достигает значения 0.2° (в 1974 г. - 30 апреля), уровень озера находится уже на отметке 100 см или несколько выше над нулем графика указанного поста. В день устойчивого перехода средней суточной температуры воды через 4° , по данным поста д. Коробово (в 1974 г. - 18 мая), озеро очищается ото льда. Более подробно эти сведения будут изложены ниже (табл. 105).

Для того чтобы выяснить, что происходит с теплозапасом оз. Кубенского от конца марта к концу апреля, рассчитаем его водообмен и теплообмен с 27 марта по 27 апреля 1974 г. Как было сказано выше, температурные данные, полученные 27 марта 1973 г., могут быть приняты за исходные для 27 марта 1974 г. Отметка уровня 27 марта 1974 г., по данным поста д. Коробово, соответствовала 107.76 м, что за вычетом толщины льда (0.63 м) составляло 107.13 м. Согласно таблице морфометрических данных (разд. 3.4. наст. изд.), указанному горизонту соответствует объем воды озера, равный 212.2 млн м³. Средняя температура 3-метрового слоя грунта (T_g^0) на ту же дату - 3.9° , средняя температура воды (T_w^0) - 0.6° при средней глубине озера (H_{cp}) - 0.95 см. Аналогичные данные на 27 апреля 1974 г. следующие: $H_w^1 = 107.60$ м, $V^1 = 339.6$ млн м³, $T_g^1 = 3.6^{\circ}$, $T_w^1 = 0.6^{\circ}$, $H_{cp}^1 = 1.8$ м.

За апрель 1974 г. средняя температура воды р. Сухоны, по данным поста д. Рабаньга, составила 0.9° . Такая высокая температура воды р. Сухоны для этого времени закономерна, поскольку обычно сток реки, вытекающей из озера, в холодный период года формируется из более плотной, а потому и более теплой воды придонных слоев. По данным того же поста, сток р. Сухоны с 27 марта по 27 апреля (V_{ct}) составил 134.3 млн м³. Нетрудно подсчитать, что приращение объема воды озера (V_{np}) от 27 марта к 27 апреля составит 127.4 млн м³. Общий приток воды в озеро

(V_{np}) за указанное время равен сумме стока из озера и указанного выше приращения объема озера:

$$V_{np} = V_{ct} + \Delta V = 261.7 \text{ млн м}^3.$$

Это на 102% больше объема воды, содержащегося в озере 27 марта 1974 г. Таков результат водообмена оз. Кубенского только в течение апреля, когда на озере еще наблюдался ледостав.

Теперь подсчитаем теплообмен озера без учета тепла, переданного донными отложениями воде за апрель 1974 г. Температура воды озера без стока из него составит

$$T_B^0 = \frac{0.60^0 \cdot V + 0.05^0 \cdot V_{np}}{V + V_{np}} = 0.30^0$$

(здесь $0.05^0 \cdot V_{np}$ – температура талой воды, поступившей в озеро за расчетный срок, и ее объем; $0.60^0 \cdot V$ – температура и объем воды озера 27 марта 1974 г.). Возможная температура воды в озере 27 апреля 1974 г. за вычетом из его теплосодержания части тепла за счет стока р. Сухоны оказывается равной

$$T_B' = \frac{0.30^0(V + V_{np}) - 0.90^0 V_{cl}}{V'} = 0.06^0$$

(0.90^0 – температура воды р. Сухоны за апрель 1974 г.; T_B' – температура воды озера на 27 апреля 1974 г.; V' – объем воды озера на 27 апреля 1974 г., млн м³).

Количество тепла, переданное донными отложениями воде с 27 марта по 27 апреля 1974 г., составит

$$\Delta W_r = W_r' - W_r = 756 - 819 = -63 \text{ кал./см}^2.$$

Оно при среднем уровне озера 1.18 м вызовет повышение температуры его воды (ΔT_B^0) на 0.53^0 . Таким образом, температура воды оз. Кубенского на 27 апреля 1974 г. равняется

$$T_B^0 + \Delta T_B^0 = 0.06^0 + 0.53^0 = 0.59^0.$$

Рассчитанная температура равняется измеренной в указанный выше день:

В приведенном выше расчете не учтено влияние тепла, поступающего в воду через лёд за счет инсоляции в апреле. Однако пренебречь им не следует, поскольку действие его безусловно, и в

озерах небольшой глубины это тепло в основном расходуется на таяние льда. Для превращения льда толщиной 0.60 м, какая была зафиксирована в озере 27 апреля 1974 г., в воду требуется очень большое количество тепла — 4.8 ккал./см².

Действительно, как было отмечено выше, начало стаивания льда на озере приходится на момент его минимального теплозапаса. Этот момент на оз. Кубенском в среднем наступает в первых числах апреля. Приток талой воды вызывает интенсивный сток теплой воды из озера. Замещение теплой воды талой водой приводит к извлечению тепла из ложа водоема. Поэтому теплозапас донных отложений в это время еще больше истощается, а теплозапас воды несколько увеличивается за счет увеличения ее объема. В итоге минимальный теплозапас озера практически не изменяется с начала стаивания льда до момента его интенсивного разрушения. Понижение теплозапаса озера за указанное время составляет, как было указано ранее, 5–6% и может не приниматься во внимание, а длительное существование температурного минимума, иногда до одного месяца, как это случилось в 1974 г., имеет само по себе большое значение для озера.

Для оз. Кубенского дату начала интенсивного стаивания и разрушения льда можно определить по сопоставлению уровня и температуры воды, измеренных на посту д. Коробово. Анализ вышеуказанных данных показал, что дата устойчивого перехода средней суточной температуры воды через 0.2° к более высоким ее значениям, по данным поста д. Коробово, совпадает или отличается на один–два дня от даты подъема уровня воды в апреле до 100 см над нулем графика указанного поста. Ежесуточные значения температуры воды и данные об уровне оз. Кубенского с 1963 по 1974 г. показывают, что в среднем период интенсивного разрушения льда на озере приходится на 15 апреля. Наиболее ранняя дата отмечалась 3 апреля 1968 г., а наиболее поздняя — 30 апреля 1974 г. Данные поста д. Коробово свидетельствуют, что только один раз за период с 1963 по 1974 г. произошло нарушение указанного соотношения — в 1966 г. Весной этого года половодье было исключительно высоким и подъем уровня озера на 100 см над нулем графика поста д. Коробово произошел на 10 дней раньше, чем температура воды стала выше 0.2°.

Дата очищения оз. Кубенского от льда, по данным того же поста д. Коробово, совпадает с окончательным переходом температуры воды через 4°. В среднем за расчетный срок очищение озера и устойчивый переход воды через 4° наступает 4 мая (табл. 105). Наиболее ранний срок наступления этих событий — 28 апреля 1962 и 1970 гг., а наиболее поздний — 18 мая 1974 г. Дата устойчивого перехода температуры воды через 4° интересна в том отношении, что она, по определению Б.Д. Зайкова (1955), знаменует собой наступление периода летнего нагревания озера.

Переход воды через температуру ее наибольшей плотности (4°) в оз. Кубенском в некоторые годы весной совершается неод-

нократно. По данным поста д. Коробово, например, в 1965 и 1972 гг. и ряде других лет температура воды в конце апреля-начале мая иногда достигала 10° , затем снижалась до 1.4 - 1.6° и снова через 3-5 дней поднималась выше 4° . Такие значительные колебания температуры воды озера нельзя объяснить только изменением погодных условий. Известно, что на крупных и глубоких озерах в период весеннего нагревания возникает термический бар (Тихомиров, 1959, 1968, 1970), который устойчиво (на Ладожском озере, например, до середины июля) разделяет этот водоем на теплоактивную и теплоинертную области. Вполне обоснованно предположить, что и на оз. Кубенском ежегодно, но кратковременно, существует термический бар и вышеупомянутые области с температурой воды выше и ниже ее наибольшей плотности. В отдельные годы на оз. Кубенском при сильном ветре происходит разрушение фронта термического бара и резкая смена температуры воды в прибрежной зоне.

Проследим, как развиваются события в этом случае. 2 мая 1972 г. температура воды на посту д. Коробово достигла 5.1° . Скорость ветра в эти сутки, как и в последующие дни, была 3-7 м/сек. 7 мая температура воды увеличилась до 8.6° , 8 мая понизилась до 5.2° , а 9 мая упала до 1.4° . В этот день ветер северного направления достигал порой 16 м/сек., а в среднем за сутки составил более 11 м/сек. В последующие два дня при ветре 7 м/сек. температура воды была 1.6 и 3.1° . Только 12 мая произошел окончательный переход температуры воды через 4° . Приведенный пример свидетельствует о кратковременном существовании термического бара на оз. Кубенском, фронт которого в отличие от крупных глубоких озер в отдельные годы может быть разрушен сильным ветром.

Еще до изучения его термического режима оз. Кубенское можно было отнести, по термической классификации озер умеренной зоны (Тихомиров, 1970), к эпитетермической группе метатермического класса. Анализ имеющихся и вновь полученных данных позволил более полно представить формирование термического режима озер упомянутой выше категории, выявить, что причина снижения их температуры воды и донных отложений – в интенсивном поступлении талой воды, вызывающей продолжительное стояние годового температурного минимума в конце ледостава, установить влияние термического бара на пространственное распределение температуры воды в период весеннего нагревания.

Для того чтобы рассмотреть характер распределения температуры воды по глубине и акватории озера в период открытой воды, обратимся к данным по температуре воды, собранным за многолетний период на постах ГМС. Эти данные представляют большую ценность в изучении изменений температурного режима озера, так как дают возможность после введения определенных поправок установить более точно средние значения температуры поверхности воды озера, необходимые для расчета составляющих теплового

Таблица 106

Поправки (в $^{\circ}\text{C}$) к средней месячной температуре поверхности (1) и водной массы (2)
оз. Кубенского по ст. Коробово

	У	VI	VII	VIII	IX	X	$\Sigma \delta T^{\circ}$
δT_n (1)	-0.3	+0.2	+1.0	+1.2	+1.3	+1.0	+4.4
δT_b (2)	-0.7	-0.8	+0.2	+0.8	+1.3	+1.2	+2.0

и водного балансов; значения температуры водной массы, используемые для расчета теплозапасов за большой ряд лет. В результате сравнения средних суточных температур воды по данным поста д. Коробово со срочными данными, полученными на рейдовой вертикали ГМС с 1961 г. и при экспедиционных исследованиях в 1972–1974 гг., установлены некоторые различия в температурах по акватории и глубине озера, причем наибольшие отмечены весной и осенью. Однако их значения в целом невелики и закономерно изменялись по сезонам года от месяца к месяцу. Имевшиеся и полученные нами данные по температуре воды за каждую декаду с мая по октябрь сводились в таблицы, где также указывалась дата наблюдений и приводилась на эту же дату средняя суточная температура по береговым наблюдениям (T_b^0) на посту д. Коробово, а также температура поверхности воды (T_n^0) и средняя температура воды (T_b^0) на вертикали, измеренной в какой-либо точке озера. В результате были получены средние ежедекадные, а потом средние месячные поправки (δT°) к средним за указанные сроки температурам воды берегового поста д. Коробово (табл. 106).

Проследим за характером изменения полученных поправок δT_n^0 и δT_b^0 от месяца к месяцу. В мае при интенсивном нагревании воды температура поверхности и температура водной массы озера имеют пониженные значения по сравнению с температурой, наблюденной на береговом посту д. Коробово, соответственно на -0.3° и -0.7° . Разность поправок ($\delta T_n^0 - \delta T_b^0$) указывает на наличие температурной стратификации в водной массе озера, которая относительно средней глубины озера выражается в мае разностью в 0.4° , в июне – 1° , в июле снижается до 0.8° , а августе – до 0.4° , а в сентябре в озере устанавливается гомотермия. В октябре температура водной массы становится выше температуры поверхности озера на 0.2° вследствие интенсивного охлаждения озера.

Данные табл. 106 показывают, что с июня по октябрь температура поверхности озера (T_n^0) выше температуры воды, измеренной на посту д. Коробово: в июне на 0.2° и в остальные месяцы на 1° и выше. Это можно объяснить тем, что водная масса мел-

ководной прибрежной области озера охлаждается более интенсивно, чем его срединная зона, за счет испарения, эффективного излучения и турбулентного теплообмена с атмосферой. Отсюда на основании динамического метода можно сделать очень важный вывод о том, что в мелководных озерах в открытый период преобладает антициклоническая циркуляция (движение по часовой стрелке) водных масс, в то время как в крупных глубоких озерах преобладает циклоническая. Вероятно, вышеуказанными причинами можно объяснить антициклоническую циркуляцию водных масс Аральского моря, где вследствие климатических особенностей его района нагревание и охлаждение выражено более ярко, чем на оз. Кубенском.

Используя данные поста д. Коробово и приведенные в табл. 106 поправки, можно получить среднюю месячную температуру поверхности (T_n^0) и водной массы (T_b^0) оз. Кубенского по формулам:

$$T_n^0 = T_b^0 \pm \delta T_n^0 ;$$

$$T_b^0 = T_b^0 \pm \delta T_b^0 ,$$

где T_b^0 – температура по данным поста д. Коробово.

В табл. 107 приводится T_n^0 и T_b^0 озера за отдельные месяцы полного цикла увлажненности района оз. Кубенского (1951–1973 гг.), включающего в себя, как указывает Т.И. Малинина (разд. 3.3 наст. изд.), период повышенной (1951–1962 гг.) и пониженной увлажненности (1963–1973 гг.). В полном цикле увлажненности за открытый период были выделены экстремальные годы по сумме температур воды (ΣT_b^0), из которых наиболее теплым оказался 1972 г., наиболее холодным – 1956 г. В этой же таблице приводятся данные по температуре воды за годы работы экспедиции (1972–1974 гг.). Из табл. 107 видим, что период пониженной увлажненности характеризуется меньшей суммой температур воды ($\Sigma T_n^0 = 77.0^\circ$ и $\Sigma T_b^0 = 74.6^\circ$), а период повышенной увлажненности – большей ($\Sigma T_n^0 = 78.2^\circ$ и $\Sigma T_b^0 = 75.8^\circ$). То же самое можно сказать и о температуре воздуха. Сумма температур воздуха с мая по октябрь по метеостанции Коробово за весь цикл увлажненности в среднем равняется 74.2° , за период повышенной увлажненности – 74.6° , а за период пониженной увлажненности – 73.7° . Температура воздуха в мае за указанные периоды соответственно равна 9.2 , 8.9 и 9.7° , т.е. выше температуры воды (табл. 107), а с июня по октябрь температура поверхности воды в отдельные месяцы становится выше температуры воздуха на 1.5 – 2.5° .

Разность между суммами T_n^0 и T_b^0 (табл. 107) за период открытой воды отдельных лет и многолетнего ряда одинакова (2.4°). Это указывает на устойчивое соотношение между температурой поверхности озера и температурой его водной массы. За открытый период (май–октябрь) вертикальная стратификация водной

Таблица 107

Средние месячные температуры поверхности воды (T_n^0) и водной массы (T_B^0)
оз. Кубенского за различные периоды

Период	У		У1		УП		УIII		IX		X		ΣT_n^0	ΣT_B^0	$\Sigma T_n^0 - \Sigma T_B^0$
	T_n^0	T_B^0													
1956 г.	5.4	5.0	17.7	16.7	15.4	14.6	15.7	15.3	8.7	8.7	4.2	4.4	67.1	64.7	2.4
1972 г.	8.3	7.9	19.1	18.1	23.8	23.0	20.1	19.7	10.7	10.7	4.3	4.5	86.3	83.9	2.4
1973 г.	10.5	10.1	18.0	17.0	19.6	18.8	16.1	15.7	7.9	7.9	2.8	3.0	74.9	72.5	2.4
1974 г.	3.8	3.4	18.0	18.0	23.0	22.2	17.2	16.8	13.0	13.0	7.2	7.4	82.2	79.8	2.4
1951- -1962гг.	8.4	8.0	16.1	15.1	19.0	18.2	17.8	17.4	11.1	11.1	4.6	4.8	77.0	74.6	2.4
1963- -1973гг.	8.9	8.5	16.4	16.4	19.4	18.6	17.9	17.5	11.2	11.2	4.4	5.6	78.2	75.8	2.4
1951- -1973гг.	8.6	8.2	16.3	15.3	19.2	18.4	17.8	17.4	11.1	11.1	4.5	4.7	77.5	75.1	2.4

Примечание. Температура воды дана с учетом поправок (см. табл. 106).

массы оз. Кубенского в среднем составляет 0.4° в месяц. В экстремальные годы (1956 и 1972 гг.) средние наименьшие или наибольшие значения T_{π}° и T_{δ}° фиксируются иногда два-три месяца подряд. В целом сумма ΣT_{π}° за холодный 1956 г. составила 86% от средней суммы ΣT_{π}° за полный цикл увлажненности, а за наиболее теплый 1972 г. - 111% от этой суммы.

Ход температуры воды в период летнего нагревания характеризуется ростом ее значений до второй декады июля, когда, по средним многолетним данным, наступает максимальный прогрев водной массы озера, который в отдельные годы может быть сдвинут относительно среднего срока на более раннее (17 июня 1961 г.) или позднее (8 августа 1971 г.) время.

Средняя декадная температура водной массы озера во второй декаде июля составляет 18.9° за период 1951-1973 гг. В отдельные годы она достигает 25° (1972 г.), а ее наиболее низкие значения наблюдались в 1956 г. - 13.8° . Средняя суточная температура водной массы озера при максимальном его прогреве может составлять $27-29^{\circ}$ (1972 г.).

С максимальным прогревом водной массы озера заканчивается период нагревания и начинается период осеннего охлаждения. Ход температуры воды приобретает тенденцию к понижению. Период осеннего охлаждения на озере продолжается в среднем до 15 октября, т.е. до момента достижения температуры наибольшей плотности (4°). В отдельные дни в результате резкого похолодания может наблюдаться явление слабой мезотермии, когда температура воды на некоторой глубине выше температуры на поверхности воды на $0.1-0.2^{\circ}$. По времени период осенного охлаждения продолжительней периода летнего нагревания в среднем на 20 суток.

Проследив ход температуры воды оз. Кубенского за открытый период, рассмотрим теплозапас его водной массы (W_B) и донных отложений (W_r). Теплозапас озера, выраженный в калориях на единицу его поверхности (см^2), позволяет сопоставлять его с теплозапасом других водоемов. Он дает возможность оценивать тепловую инерцию озера, а также предвидеть изменения его температурного режима. Теплозапас озера обычно определяется на первое число каждого месяца, что позволяет установить величину изменения (приращения) теплозапасов водной массы (ΔW_B) и донных отложений (ΔW_r) за месяц. Для оз. Кубенского теплозапас и его изменение определялись за открытый период с 1 мая по 1 ноября отдельных лет и расчетного периода.

На момент определения теплозапас водной массы и донных отложений озера рассчитывался по формуле

$$W = C \cdot H \cdot T^0,$$

где W - теплозапас, кал./ см^2 ; C - объемная теплоемкость (кал.
 $\text{см}^3 \cdot \text{град.}$) воды, принимаемая за единицу; H - средняя глубина

слоя, м; T° – средняя температура слоя; необходимая для расчета теплозапаса водной массы озера на первое число каждого месяца средняя глубина озера определялась из данных наблюдений за уровнем воды и морфометрических данных (разд. 3.4, наст. изд.). Для определения температуры воды на первое число использовались непосредственные данные термосъемок за 1 октября 1972 г., 1 июня, 1 июля, 1 сентября 1973 г. и 1 июля и 1 сентября 1974 г. Данные термосъемок сравнивались со средними суточными и декадными температурами воды по данным поста д. Коробово с целью возможного использования последних при определении температуры водной массы озера. Сравнение показало, что наиболее близкой к температуре воды, полученной при термосъемках, является температура воды, снятая на ту же дату с графика хода ее средних декадных значений. Поэтому при отсутствии данных термосъемок температура воды на 1 число какого-либо месяца снижалась с графика хода ее средних декадных значений, после чего в нее вводилась температурная поправка (δT°), осредненная за два смежных месяца (табл. 108).

Полученные таким образом теплозапасы водной массы оз. Кубенского приводятся в табл. 109. Данные ее позволяют проследить за изменением теплозапасов водной массы озера в период открытой воды. Накопление тепла водной массой озера продолжается с ростом температуры воды при некотором снижении уровня озера в среднем до середины июля, когда теплозапас водной массы достигает 5.7 ккал./см^2 . После максимального прогрева водной массы озера в результате охлаждения воды и снижения ее уровня теплозапас водной массы снижается, и в начале ноября он близок к нулю (табл. 109).

Ежемесячное приращение теплозапаса водной массы (ΔW_b) определяется как разность между величиной теплозапаса водной массы в конце и начале данного месяца (табл. 109). Из данных табл. 109 видно, что положительные значения ΔW_b приходятся на май и июнь. В июле приращение теплозапаса воды близко к нулю, а в отдельные годы (1956, 1972–1973 гг.) ΔW_b имеет отрицательное значение. С августа по октябрь ΔW_b – отрицательная величина.

Наиболее интенсивное накопление тепла озером происходит в мае. Приращение теплозапаса водной массы за указанный месяц достигает в среднем 2.9 ккал./см^2 (табл. 109). Однако значение радиационного баланса в мае (8.2 ккал./см^2) меньше, чем в июне (10.2 ккал./см^2), из чего следует, что максимальное приращение теплозапаса водной массы оз. Кубенского в мае обусловлено не столько величиной радиационного баланса, сколько интенсивным поступлением воды в озеро.

В крупных глубоких озерах (Ладожском и Онежском) тепловой приток и сток практически не влияют на величину приращения теплозапаса водной массы (Веселова, 1968; Кириллова, 1973), в то время как в оз. Кубенском тепловой приток и сток, как указы-

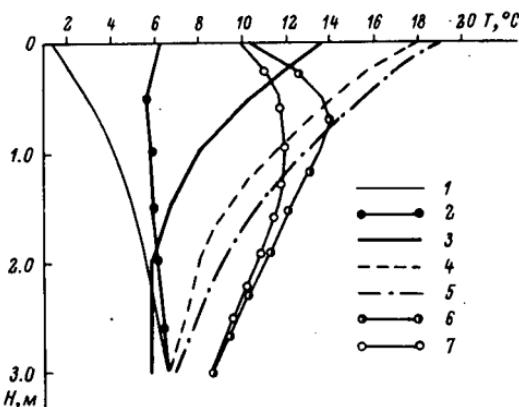


Рис. 81. Распределение температуры донных отложений озера на ст. 4 в 1973 г.

1 - 27 III; 2 - 1 Y; 3 - 31 Y; 4 - 28 VI; 5 - 13 VII; 6 - 30 VIII; 7 - 9 IX.

Т а б л и ц а 108

Температура воды оз. Кубенского за различные годы,
снятая с графиков хода ее средних
декадных значений

Год	1 Y	1 YI	1 YII	1 YIII	1 IX	1 X	1 XI
1956	0.6	12.5	16.9	14.9	12.2	6.0	2.2
1972	3.6	13.8	23.3	20.3	14.9	6.0	0.6
1973	4.8	14.8	20.0	17.0	11.1	5.6	0.2
1974	1.5	10.4	19.8	20.3	16.0	11.2	3.0
Среднее за 1951- 1973	3.3	12.4	17.2	18.7	14.8	7.4	2.9

вает В.А. Кириллова (разд. 5.3, наст. изд.), оказывает большое влияние на теплозапас этого водоема.

Для определения теплозапаса донных отложений по вышеприведенной формуле необходимо знать теплоемкость и среднюю температуру теплоактивного слоя. Ранее было отмечено, что при ледоставе поступление талой воды вызывает снижение температуры водной массы озера и в среднем около 20 апреля теплозапас донных отло-

Таблица 109

Теплозапас водной массы (W_B , ккал./см²)
оз. Кубенского за различные годы

Год	1 У	1 УІ	1 VII	1 VIII	1 IX	1 X	1 XI
1956	0.1	4.0	5.1	4.4	3.6	1.5	0.60
1972	1.1	4.2	7.0	5.8	3.6	1.1	0.08
1973	1.4	4.5	5.9	4.3	2.3	1.0	0.03
1974	0.2	3.4	6.0	6.0	4.3	2.4	0.50
Среднее за 1951- 1973	1.0	3.9	5.2	5.5	4.0	1.7	0.60

жений снижается до минимума. При достижении водой температуры 2° тепловой поток приобретает направление от воды к донным отложениям. Общее представление о ходе температуры донных отложений от весны к осени дает рис. 81. Кривая 1 показывает изменение температуры грунта в теплоактивном слое в конце марта. В это время по всей глубине теплопоток направлен вверх к воде. В начале мая (рис. 81, кривая 2) теплопоток в слое донных отложений направлен вниз при состоянии теплоактивного слоя, близком к гомотермии. В конце мая (кривая 3) температура приводного слоя донных отложений значительно возрастает (до 12-14°), а температура нижнего горизонта теплоактивного слоя становится ниже, чем была в конце марта-начале мая. Подобное понижение температуры грунта в период интенсивного поступления тепла от воды к теплоактивному слою донных отложений на Рыбинском водохранилище отмечал С.Н. Тачалов (1966), не объясняя, однако, природу этого явления. А.А. Пивоваров (1972) указывает на возможный приток грунтовых вод и их влияние на снижение температуры донных отложений. Действительно, по распределению и снижению температуры донных отложений на продольных профилях озер Кубенского, Воже и Лача можно судить о влиянии подземного притока вод на температуры грунтов в период интенсивного прогрева водной массы озер в июне. В конце июня весь теплоактивный слой донных отложений интенсивно прогревается за счет тепла, поступающего от водной массы озера (рис. 81, кривая 4), и в дальнейшем этот процесс длится до конца июля, т.е. до момента окончательного наступления периода осеннего охлаждения воды.

Максимальный прогрев донных отложений оз. Кубенского наступает на 15-45 дней позже максимального прогрева водной массы. Смещение максимального прогрева донных отложений в разные

годы происходит в зависимости от начала их весеннего прогрева. По окончании периода накопления тепла донными отложениями озера в конце августа – начале сентября начинается период их охлаждения (рис. 81, кривые 6 и 7). С одной стороны, происходит передача тепла в воду, а с другой – продолжается передача тепла нижележащим слоям донных отложений. Передача тепла к нижним горизонтам теплоактивного слоя продолжается до октября, а в отдельные годы и весь октябрь (Тачалов, 1968). В октябре температура донных отложений на нижней границе активного слоя достигает максимального в году значения – 8–9°. В дальнейшем процесс охлаждения охватывает весь теплоактивный слой донных отложений. Распределение температуры в них характеризуется обратной термической стратификацией, которая сохраняется вплоть до периода весеннего нагревания.

Измерение температуры донных отложений при термосъемках производилось по сети указанных ранее станций, что дает возможность рассмотреть изменение температуры донных отложений оз. Кубенского по его площади. Термосъемки выполнялись в течение 2–3 дней, что при значительной тепловой инерции донных отложений позволяет считать наблюдения над их температурой одновременными. Температура поверхности грунта по площади дна озера изменилась не более чем на 1–2°. На нижележащих горизонтах эти различия становились еще менее заметными. Следует отметить, что термические разрезы, выполненные при экспедиционных исследованиях, не выявили каких-либо резких различий в термическом режиме прибрежных районов озера и его центральной части. Это объясняется, по-видимому, тем, что котловина озера имеет плоскую, слаженную форму (отсутствуют резкие перепады глубин). Теплофизические свойства донных отложений в прибрежных зонах и в центральной части озера также не имеют резких различий между собой при большой однородности температуры воды у дна. Все это в совокупности определяет однородность условий теплообмена по всей площади оз. Кубенского.

Полученные материалы по температурному режиму донных отложений оз. Кубенского использованы как исходные для определения ежемесячных значений и приращений теплозапасов донных отложений озера (ΔW_r) за расчетный период (1951–1973 гг.) и отдельные годы (1956, 1972, 1973 и 1974). При подсчете W_r необходимо было знать температуру донных отложений на разных горизонтах на 1-е число каждого месяца. В процессе решения этого вопроса возникли определенные трудности. Вначале была сделана попытка определить температуру донных отложений по известной формуле распространения температурных волн (уравнение Фурье). Варианты этой формулы приводятся в работах Н.Н. Корытниковой (1940), А.П. Braslavskogo и Викулиной З.А. (1954), Д. Хатчинсона (1969) и в „Методических рекомендациях по изучению режима температуры подземных вод“ (1973), составленных Н.М. Фроловым. Уравнение Фурье в том виде, в котором оно изложено в по-

следней из вышеуказанных работе, представляется более удобным для использования. Оно имеет следующий вид:

$$T_x = T_{H.C} + \Delta t e^{-x K_1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi\tau}{\tau} - x \sqrt{\frac{\pi}{4\alpha}}\right),$$

где T_x – температура на глубине x ; $T_{H.C}$ – температура „нейтрального слоя“ (под „нейтральным слоем“ понимается слой неизменных годовых температур, располагающийся ниже теплоактивного слоя донных отложений); τ – время от „нулевого времени“, сек.; K_1 – коэффициент затухания температурной волны; τ – период колебаний (цикл), сек.; Δt – температурная амплитуда на поверхности дна озера; α – коэффициент температуропроводности ($\text{см}^2/\text{сек.}$), полученный как средний для всего озера.

Приняв средний коэффициент молекулярной температуропроводности α равным $0.004 \text{ см}^2/\text{сек.}$, за дату „нулевого времени“ – 15 апреля, годовую амплитуду температур на поверхности дна (Δt) равной 20° , рассчитали по указанной формуле температуры донных отложений на разных горизонтах на даты проведения термосъемок с тем, чтобы иметь возможность сравнивать рассчитанные и наблюденные величины. Проведенное сравнение показало, что при некоторых удивительных результатах большинство рассчитанных данных, полученных по указанной формуле, не отвечает требованиям презентативности. Это объясняется сложностью определения таких составляющих уравнения, как коэффициент α и дата „нулевого времени“. Неизбежные погрешности при определении этих характеристик в конечном счете приводят к искажению результатов расчета. С.Н. Тачаловым (1968) для Рыбинского водохранилища были рассчитаны температуры донных отложений по формуле, рекомендованной А.П. Браславским (1954), не давшей положительных результатов. Причину расхождения рассчитанных и наблюденных величин С.Н. Тачалов объясняет несоответствием распределения температуры в грунтах периодической функции, лежащей в основе расчета.

Учитывая вышеизложенное, мы в расчете температуры воды и донных отложений использовали суммы ежесуточных температур воды по данным поста д. Коробово. Кроме того, были использованы данные термосъемок донных отложений на горизонтах 0.25 , 0.5 и далее через полметра в теплоактивном слое на первое число с мая по ноябрь и соответствующие суммы ежесуточных температур воды. Отсчет сумм средних суточных температур воды для каждого года велся от даты перехода температуры воды через 4° . В результате, например, на 1 июня 1972 г. сумма ежесуточных температур воды составила 215° , на 1 июня 1973 г. – 340° и 1974 г. – 90° . Делением полученной суммы ежесуточных температур воды на температуру донных отложений того или иного горизонта были получены коэффициенты K , по которым для каждого года были построены номограммы (рис. 82). Анализ номограмм

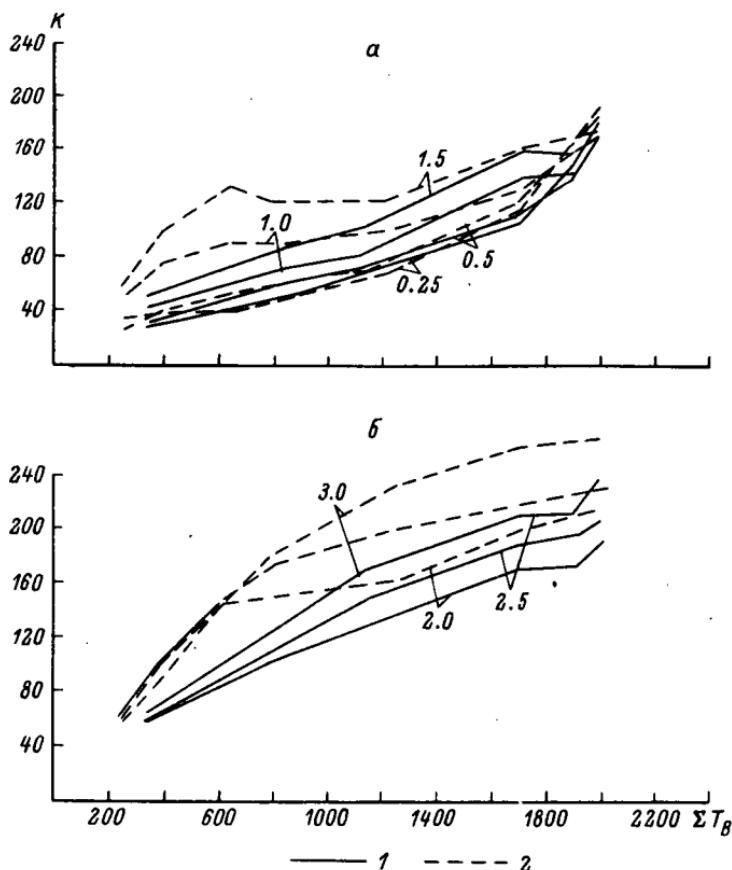


Рис. 82. Номограммы для определения температуры донных отложений озера на горизонтах 0.25–1.5 м (а) и 2.0–3.0 м (б).

1 – для лет с поздним переходом T_B^0 через 4° . 2 – для лет с ранним переходом T_B^0 через 4° .

показал, что коэффициенты K для горизонта 0.25 и 0.5 м различных лет схожи между собой, а для 1 м и более глубоких горизонтов они значительно отличаются друг от друга. Сопоставление последних показало, что в годы позднего наступления периода летнего нагревания температура донных отложений на горизонте 1.0 м и более глубоких значительно ниже, чем в годы с ранним переходом температуры воды через 4° . Такое различие в температуре донных отложений, а следовательно, и значений K можно объяснить более поздним поступлением грунтовых холодных (тальных) вод в донные отложения озера. Поэтому при использовании указанных коэффициентов 1973 год был принят как эталон для других лет с

Таблица 110

Рассчитанные температуры (в $^{\circ}\text{C}$)
теплоактивного слоя донных отложений оз. Кубенского
на первое число с мая по ноябрь

Год	1 V	1 VI	1 VII	1 VIII	1 IX	1 X	1 XI
1956	3.2	5.0	7.5	9.8	10.6	10.1	9.6
1972	5.2	7.0	9.1	11.4	10.7	9.2	8.0
1973	5.9	7.9	10.7	11.4	11.5	9.6	9.1
1974	3.2	4.9	7.9	10.9	11.0	10.0	9.4
Среднее за 1951- -1973	4.4	6.2	8.7	10.9	10.9	9.7	9.0

ранним наступлением периода летнего нагревания, 1972 – нормального, а 1974 – позднего.

Для определения температуры донных отложений на 1 мая использовались данные термосъемок от 27 марта и 31 мая 1973 г. и от 28 апреля и 10 июля 1974 г. На основании совпадения условий теплонакопления в 1972 и 1973 гг. за исходные для 1972 г. приняты данные термосъемки от 27 марта 1973 г., отнесенные к началу интенсивного разрушения льда на озере (16 апреля 1972 г.), и расчетные данные на 1 июня, полученные по номограмме 1973 г. Начало интенсивного разрушения льда на озере, как уже было сказано, в 1972 г. пришлось на 16 апреля, в 1973 г. – на 7 апреля, в 1974 г. на 28 апреля. Средняя многолетняя дата начала интенсивного разрушения льда и перехода температуры воды через 0.2° приходится на 15 апреля. Следует учесть, что дата начала интенсивного разрушения льда не определяет дату наступления летнего периода нагревания, как это было, например, в 1973 г. Предположив, что за время окончательного перехода температуры воды от 0.2 до 4° , по данным поста д. Коробово, каждый горизонт донных отложений пропорционально времени изменяет свою температуру, путем экстраполяции мы получили их температуру на 1 мая, а затем рассчитали теплозапас слоя донных отложений озера на указанную дату. Температура донных отложений за весенний период наиболее холодного 1956 г. была вычислена по условиям весны 1974 г. с учетом суммы температур воды 1956 г. В среднем за период 1951–1973 гг. температура донных отложений на первое число с мая по ноябрь вычисляется как средняя из всех расчетных лет, в которые входят наиболее теплый 1972 г. и наиболее холодный 1956 г. (табл. 110).

Таблица 111

Рассчитанный теплозапас (в ккал./см²)
 теплоактивного слоя донных отложений (W_f) оз. Кубенского
 на первое число с мая по ноябрь

Год	1 У	1 У1	1 УП	1 УШ	1 IX	1 X	1 XI
1956	0.7	1.0	1.6	2.1	2.2	2.1	2.0
1972	1.1	1.5	1.9	2.4	2.2	1.9	1.7
1973	1.3	1.7	2.2	2.4	2.4	2.0	1.9
1974	0.7	1.0	1.6	2.3	2.3	2.1	2.0
Среднее за 1951-1973	0.9	1.3	1.8	2.3	2.3	2.0	1.9

Наибольшие различия в температуре донных отложений от года к году наблюдаются с мая по август, снижаются к 1 сентября, а затем снова несколько увеличиваются при охлаждении водной массы озера.

Полученные температуры донных отложений на первое число с мая по ноябрь позволили определить теплозапас их теплоактивного слоя на эти же даты (табл. 111). Как было указано выше, средняя объемная теплоемкость донных отложений оз. Кубенского была принята равной 0.7 ккал./см².

По данным табл. 111 рассмотрим изменение теплозапасов донных отложений в период с мая по октябрь. Средняя многолетняя величина теплозапаса донных отложений на 1 мая (0.9 ккал./см²) близка к годовому минимуму, величина которого, по данным термо-съемок, изменяется по годам в пределах 0.7-0.9 ккал./см². По мере прогревания озера теплозапасы его донных отложений увеличиваются и достигают своего максимального значения в августе (табл. 111). По сравнению с водной массой озера, максимальный прогрев которой приходится в среднем на 15 июля, запасы тепла в донных отложениях достигают максимального значения, как уже указывалось, на 15-45 дней позднее в зависимости от начала прогрева озера и его интенсивности. Для Рыбинского водохранилища (Тачалов, 1968) и оз. Великого в Калининской области (Форш, 1968) величина сдвига максимального прогрева донных отложений по отношению к прогреву водной массы определяется в 40-45 дней. С первых чисел сентября теплозапасы донных отложений начинают уменьшаться и к 1 ноября становятся равными 1.9 ккал./см² (табл. 111). К моменту ледостава величина теплозапаса на 1 ноября уменьшится незначительно. Учитывая это, можно определить, что за период ледостава донные отложения передадут в воду около 0.9 ккал./см², т.е. половину своего максимального теплозапаса.

Таблица 112

Средний суммарный теплозапас оз. Кубенского
на первое число с апреля по ноябрь

	1 IV	1 V	1 VI	1 VII	1 VIII	1 IX	1 X	1 XI
Теплозапас водной массы (W_B), ккал./см ²	0.09	1.0	3.9	5.2	5.5	4.0	1.7	0.6
Донных от- ложений (W_f), ккал./см ²	0.83	0.9	1.3	1.8	2.3	2.3	2.0	1.9
Суммарный ($W_B + W_f$), ккал./см ²	0.92	1.9	5.2	7.0	7.8	6.3	3.7	2.5
Донных ст- ложений в долях от сум- марного, %	90	47	25	26	29	36	54	76

Изменение теплозапасов донных отложений во времени происходит с разной интенсивностью (табл. 111). Данные табл. 111 показывают, что наибольшее количество тепла донные отложения получают в июне–июле. Наименьшее приращение теплозапасов донных отложений приходится на август. С начала сентября донные отложения начинают отдавать тепло в воду (табл. 111).

Расчет теплозапасов оз. Кубенского позволяет оценить роль донных отложений в тепловом бюджете этого водоема. Данные термосъемок показали, что в конце марта, а в отдельные годы (1974 г.) и в конце апреля, доля теплозапаса донных отложений в общем теплозапасе озера составляет около 90%. В среднем к 1 мая она уменьшается до 47% (табл. 112). С дальнейшим прогревом озера до максимального и в начале периода осеннего охлаждения доля теплозапаса донных отложений колеблется в пределах 25–30% общего теплозапаса озера. В период осеннего охлаждения она возрастает от 30 до 60% и к наступлению ледостава достигает максимальной в году величины – 90–98%. Весной к моменту термического минимума теплозапас теплоактивного слоя донных отложений в среднем в 10 раз превышает теплозапас водной массы.

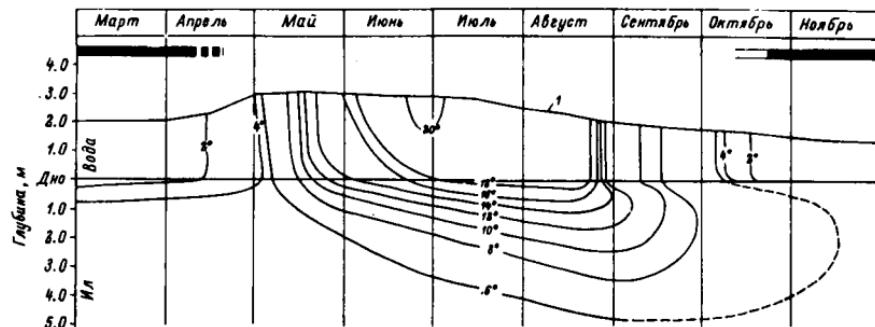


Рис. 83. Сезонные изменения температуры воды и донных отложений озера в 1973 г.

Жирная линия – изменение средней глубины озера.

В течение ледоставного периода тепло, аккумулированное донными отложениями в теплый период года, в мелководных водоемах умеренной зоны в значительной мере создает более благоприятные условия для обитания водных организмов не только тем, что за счет него повышается температура воды, но и тем, что сдерживает интенсивное нарастание толщины льда, благодаря чему большее количество воды остается в жидкой фазе, а площадь прибрежных районов озера, промерзших до дна, уменьшается.

В заключение рассмотрим рис. 83, где приводится сезонный ход температуры воды и донных отложений в 1973 г., который является характерным для оз. Кубенского. Анализируя указанный рисунок, можно заметить некоторые особенности в термическом режиме озера. Рассмотрим период открытой воды. В это время благодаря неустойчивости метеорологических условий ход температуры водной массы озера характеризуется резкими колебаниями ее значений на фоне общей тенденции увеличения температуры воды к середине июля. Изменения температуры донных отложений в это же время имеют более плавный ход. Теплозапас донных отложений постепенно увеличивается.

Наиболее интересная и менее изученная особенность термического режима оз. Кубенского заключается в том, что теплозапас озера, значительно истощенный за зимний период, продолжает уменьшаться и с наступлением весеннего периода. Уменьшение теплозапаса озера происходит за счет поступления в водоем талых вод. Значительная часть водной массы озера замещается талыми водами еще подо льдом, и в связи с этим изменяются его гидрохимические и биологические показатели.

5.5. Т е п л о в о й б а л а н с

На термический режим оз. Кубенского большое влияние оказывают его морфометрические особенности и малая глубина при сравнительно большой площади. Малая глубина озера благоприятствует быстрому прогреванию и охлаждению его водной массы. Частые изменения силы и направления ветра, облачности, влажности воздуха и других компонентов гидрометеорологических условий постоянно и в значительной степени меняют интенсивность и направление теплопотоков поверхности озера. Вследствие этого изучение и расчет составляющих теплового баланса неглубоких и больших по площади озер значительно осложняется. Для повышения достоверности значений составляющих теплового баланса таких озер они вычисляются за одни и те же месяцы как средние из многолетнего ряда. Отсутствующие исходные данные восстанавливаются тем или иным путем с некоторой погрешностью. Это обстоятельство также оказывает неблагоприятное влияние на точность определения указанных составляющих. Существующие трудности в расчете составляющих теплового баланса в настоящее время преодолеть еще не удается.

Наша задача состояла в том, чтобы получить ежемесячные составляющие теплового баланса и рассчитать сам тепловой баланс за период с мая по октябрь (1951–1973 гг.), а также за экстремальные годы – 1956 и 1972, выбранные нами по сумме средних месячных температур воды за период свободный ото льда по данным поста д. Коробово, и за годы работы экспедиции (1972–1974). Радиационный баланс оз. Кубенского за указанные выше период и годы был рассчитан Э.М. Гореловой (разд. 5.1, наст. изд.); затраты тепла на испарение и турбулентный теплообмен между поверхностью озера и атмосферой – А.Ф. Изотовой (разд. 5.2, наст. изд.); тепловой приток и сток – В.А. Кирилловой (разд. 5.3, наст. изд.); температурный режим, теплозапасы водной массы и донных отложений – А.Н. Егоровым и А.И. Тихомировым (разд. 5.4, наст. изд.).

Уравнение теплового баланса оз. Кубенского, представленное суммой основных его составляющих, имеет следующий вид:

$$B \pm LE \pm P \pm Q_{np} - Q_{ct} \pm \Delta W_B \pm \Delta W_r = 0,$$

где B – радиационный баланс; LE – затраты тепла на испарение; P – турбулентный теплообмен между поверхностью озера и атмосферой; Q_{np} – приток тепла с водою рек, впадающих в озеро; Q_{ct} – тепловой сток с водою из озера; ΔW_B – приращение теплозапаса водной массы озера; ΔW_r – приращение теплозапаса донных отложений теплоактивного 3-метрового слоя.

В уравнение теплового баланса не были включены затраты тепла на таяние льда в мае и его образование в октябре, посколь-

ку отсутствовали сведения о ледовых условиях по озеру в переходные периоды. Не учитывалось нами также тепло, поступающее в озеро с дождевыми осадками. На оз. Кубенское с мая по октябрь выпадает 443 мм жидких осадков (разд. 5.2, наст. изд.). Если принять температуру осадков равной температуре воздуха, то в июне–августе значение этой составляющей будет несколько выше $0.1 \text{ ккал./см}^2\cdot\text{мес}$. Однако, вероятно, температура осадков несколько ниже температуры воздуха. Поэтому можно ожидать, что значение рассматриваемой величины лежит в пределе точности расчета основных составляющих теплового баланса озера. Включать ее в уравнение, как и другие составляющие, значение которых заведомо меньше $0.1 \text{ ккал./см}^2\cdot\text{мес}$, было нецелесообразно.

За расчетный период (1951–1973 гг.) наиболее холодным по сумме средних месячных температур воды, согласно данным поста д. Коробово, был 1956 г., а наиболее теплым – 1972 г. Эти экстремальные значения ежемесячных сумм температуры воды за открытый период были характерны не только для оз. Кубенского и близких к нему по морфометрическим данным и гидрологическому режиму озер Воже и Лача (Егоров и Тихомиров, 1975), но и для крупных водоемов Северо-Запада – Ладожского и Онежского (Тихомиров, 1973). Сумма средних месячных температур воды оз. Кубенского, по данным поста д. Коробово, в 1956 г. с мая по октябрь составила 65.9° , а в 1972 г. – 81.9° при среднем ее значении за рассматриваемый период увлажненности 73.1° .

Рассмотрим значения составляющих теплового баланса оз. Кубенского за период, свободный от льда, в среднем за 1951–1973 гг. (табл. 113). Положительные значения B , R , Q_{np} указывают на повышение теплозапаса, а отрицательные значения B , LE , R , Q_{ct} – на снижение теплозапаса водной массы озера. Накопление тепла водой (ΔW_B) и донными отложениями (ΔW_r) обозначено отрицательными знаками, а его снижение – положительными знаками. Положительные значения радиационного баланса (B) с мая по сентябрь указывают на то, что озеро за счет лучистого теплообмена получает тепло. В октябре радиационный баланс имеет отрицательное значение, поскольку в указанном месяце эффективное излучение достигает 2.5 ккал./см^2 и преобладает над поглощаемой водой суммарной солнечной радиацией. За многолетний период в октябре B равно -0.6 ккал./см^2 и в отдельные годы отклоняется от указанной величины на $\pm 0.2 \text{ ккал./см}^2$. В среднем за расчетный период сумма B с мая по октябрь равна 35.2 ккал./см^2 , наибольшая в 1972 г. – 38.8 , а наименьшая в 1956 г. – 34.4 ккал./см^2 (табл. 114). Сумма средних многолетних значений радиационного баланса оз. Кубенского за указанные месяцы (35.2 ккал./см^2) почти полностью совпадает с таковой (35.1 ккал./см^2) шхерного района и самого Онежского озера (36.2 ккал./см^2). Обычно наибольшая потеря тепла оз. Кубенским за счет испарения наблюдается в июле, когда температура поверхности воды достигает максимума, и в среднем за указанный месяц составляет -5.7 ккал./см^2 . При

Т а б л и ц а 113

Средние месячные значения составляющих теплового баланса
(в ккал./см² мес.) оз. Кубенского за многолетний период
(1951-1973 гг.)

	V	VI	VII	VIII	IX	X	Σ_{Y-X}
B	8.2	10.2	9.6	6.0	1.8	-0.6	35.2
LE	-2.9	-5.0	-5.7	-4.6	-2.9	-1.6	-22.7
P	0.1	-0.5	-0.9	-0.7	-1.0	-0.7	-3.7
Q _{np}	1.9	1.0	0.7	0.6	0.4	0.3	4.9
Q _{ct}	-1.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.0	-0.4	-8.5
ΔW_B	-2.9	-1.3	-0.3	1.5	2.3	1.1	0.4
ΔW_r	-0.4	-0.5	-0.5	0.0	0.3	0.2	-0.9
$\Sigma (+)$	10.2	11.2	10.3	8.1	4.8	1.6	40.5
$\Sigma (-)$	7.4	9.4	9.4	7.1	4.9	3.3	35.8
δ	2.8	1.8	0.9	1.0	-0.1	-1.7	4.7

максимальной температуре поверхности воды в июле 1972 г. (23.8°) потеря тепла на испарение составила 9.8 ккал./см². При смещении средней месячной максимальной температуры поверхности воды (17.7°) на июнь в 1956 г. затрата тепла на испарение составила 4.5 ккал./см², а в июле (15.4°) того же года — только 3.7 ккал./см².

На примере оз. Онежского можно заметить, что в крупных глубоких водоемах затраты тепла на испарение достигают наибольших значений в ноябре, когда разность между средней месячной температурой поверхности воды и средней месячной температурой воздуха становится положительной и наибольшей. В мелководных крупных озерах, таких как оз. Кубенское, это происходит обычно в июле. Затраты тепла на испарение являются основной статьей расхода всего поступающего тепла в водную массу оз. Кубенского за счет лучистой энергии солнца с мая по октябрь и составляют от поглощенного водой тепла 42.9%, а от радиационного баланса — 64.4%. В экстремальные годы — 1956 и 1972 — затраты тепла на испарение соответственно изменялись от 19.2 до 28.5 ккал./см², составляя в среднем за свободный от льда период 22.7 ккал./см² (табл. 113, 114).

Поток тепла при турбулентном теплообмене между поверхностью озера и атмосферой направлен от воды, если ее температура

Таблица 114

Средние месячные величины составляющих
теплового баланса (в ккал./см²) Кубенского озера
за экстремальные годы (1956 и 1972 гг.)
расчетного периода и годы работы экспедиции
(1972-1974 гг.)

	Y	YI	YII	YIII	IX	X	$\Sigma Y-X$
1956 г.							
B	8.7	11.4	8.4	5.1	2.0	-0.7	34.9
LE	-0.8	-4.5	-3.7	-3.2	-3.1	-2.0	-17.3
P	1.5	0.4	-0.7	-0.7	-0.9	-1.2	-1.6
Q _{np}	1.7	0.3	0.3	1.3	0.4	0.3	4.3
Q _{ct}	-0.7	-1.1	-1.5	-1.9	-1.0	-0.5	-6.7
ΔW_B	-3.9	-1.1	0.7	0.8	2.1	1.0	-0.4
ΔW_r	-0.4	-0.5	-0.5	-0.2	0.1	0.1	-1.4
$\Sigma (+)$	11.9	12.1	9.4	7.2	4.6	1.4	39.2
$\Sigma (-)$	5.8	7.2	6.4	6.0	5.0	4.4	27.4
δ	6.1	4.9	3.0	1.2	-0.4	-3.0	11.8
1972 г.							
B	8.5	10.7	10.6	7.4	2.2	-0.6	38.8
LE	-2.7	-6.1	-9.8	-5.6	-2.8	-1.5	-28.5
P	0.0	-0.9	-1.3	0.0	-0.6	-0.5	-3.3
Q _{np}	1.4	0.7	0.2	0.2	0.1	0.1	2.7
Q _{ct}	-0.8	-1.4	-1.8	-1.6	-0.8	-0.3	-6.7
ΔW_B	-3.2	-2.8	1.3	2.2	2.5	1.1	1.1
ΔW_r	-0.4	-0.4	-0.5	0.2	0.3	0.3	-0.5
$\Sigma (+)$	9.9	11.4	12.1	10.0	5.1	1.5	42.6
$\Sigma (-)$	7.1	11.6	13.4	7.2	4.2	2.9	39.0
δ	2.8	-0.2	-1.3	2.8	0.9	-1.4	3.6
1973 г.							
B	9.5	10.6	11.0	7.0	1.6	-0.8	38.9
LE	-4.1	-5.3	-7.6	-3.2	-2.2	-1.9	-24.3
P	0.2	-0.3	-0.8	-0.1	-1.0	-0.9	-2.9
Q _{np}	0.8	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	1.6
Q _{ct}	-0.8	-1.3	-1.2	-1.0	0.5	1.0	-4.9
ΔW_B	-3.0	-1.4	1.5	2.1	1.3	1.0	1.5
ΔW_r	-0.4	-0.6	-0.2	0.0	0.4	0.1	-0.7
$\Sigma (+)$	10.5	10.9	12.7	9.2	3.4	1.2	42.0
$\Sigma (-)$	8.3	8.9	9.8	4.3	3.7	3.7	32.8
δ	2.2	2.0	2.9	4.9	-0.3	-2.5	9.4

Таблица 114 (продолжение)

	У	У1	УII	УIII	1Х	Х	Σ_{Y-X}
1974 г.							
В	8.0	10.6	9.6	5.7	2.5	-0.5	35.9
LE	-0.8	-5.7	-6.6	-3.4	-3.2	-1.4	-21.1
P	1.1	-0.8	-1.5	-0.7	-0.4	-0.4	-2.7
Q_{np}	1.2	1.0	0.2	0.3	0.2	0.1	3.0
Q_{ct}	-0.5	-2.6	-1.3	-1.1	-0.8	-0.4	-6.7
ΔW_B	-3.1	-2.6	0.0	1.7	1.9	1.9	-0.2
ΔW_r	-0.4	-0.6	-0.7	0.0	0.2	0.1	-1.4
$\Sigma +$	10.3	11.6	9.8	7.7	4.8	2.1	38.9
$\Sigma -$	4.8	12.3	10.1	5.2	4.4	2.7	32.1
$\bar{\delta}$	5.5	-0.7	-0.3	2.5	0.4	-0.6	6.8

выше температуры воздуха. Из таблиц 113 и 114 легко установить, что только в мае температура поверхности воды озера бывает ниже температуры приводного слоя воздуха, а с июня по октябрь — выше. Эта закономерность проявляется на неглубоких озерах и водохранилищах (Зайцева, 1965 и др.). Потери тепла водной массой за счет турбулентного теплообмена между поверхностью оз. Кубенского и атмосферой, равно как и за счет испарения, достигают максимума в июле (0.9 ккал./см^2), составляя за безледный период 3.7 ккал./см^2 , или 10.5% радиационного баланса.

С притоком воды в озеро его теплозапас растет, а со стоком — уменьшается. Поэтому в уравнении теплового баланса член Q_{np} имеет положительное, а член Q_{ct} — отрицательное значение. При изучении термического режима оз. Кубенского (разд. 5.4, наст. изд.) указывалось, что в конце марта озеро начинает наполняться талой водой и его уровень несколько повышается. С конца марта по май при ледоставе объем притока воды может превзойти объем воды (без учета объема льда), содержащейся в озере к началу его наполнения. При этом талая, более холодная вода, вытесняет из водоема зимнюю теплую озерную воду в р. Сухону, поддерживая, а иногда и увеличивая экстремальность минимального теплозапаса озера в апреле. Происходит это вследствие того, что поступающей через лёд лучистой энергии солнца недостаточно для повышения температуры талой воды до значения, которое имела вода озера к началу его наполнения. В мае увеличение объема притока при одновременном повышении температуры поступающей воды вызывает значительное увеличение теплозапаса озера. Тепловой приток в этом месяце является наиболее высоким, достигая в среднем 1.9 ккал./см^2 , и ежегодно преобладает над тепловым стоком из озера. В последующие месяцы тепловой приток постепенно сокра-

щается, составляя с мая по октябрь в среднем 4.9 ккал./см² и снижаясь в отдельные годы до 1.6 ккал./см².

Тепловой сток из озера наибольшего развития достигает в июле, а иногда и в августе, составляя в указанные месяцы 2.1-2.6 ккал./см². Общая сумма теплового стока за период открытой воды в среднем равна - 8.5 ккал./см², что меньше в 2.6 раза тепла, теряемого озером на испарение, и в то же время почти вдвое больше тепла, поступающего со стоком рек, впадающих в озеро. Разность между тепловым стоком и притоком тепла с водою рек сопоставима с потерей тепла озером за счет его турбулентного обмена с атмосферой (-3.6 и 3.7 ккал./см²) за открытый период.

Теплозапас водной массы оз. Кубенского наиболее интенсивно увеличивается в мае (на 2.9 ккал./см², табл. 113), и, возрастающая наполовину в июне, в июле почти удерживается на этом уровне (табл. 113, 114, 1974 г.), а в некоторые годы даже снижается на 1.3-1.5 ккал./см² (табл. 114, 1972 и 1973 гг.). Из таблиц 113 и 114 видим, что увеличение теплозапаса водной массы озера за май-июль, иногда за май-июнь, составляет всего 4.4-6.0 ккал./см², что при средней глубине озера 2.7-3.0 м соответствует приращению температуры воды за указанные месяцы на 17-22°. В то же время за указанные месяцы общее количество поступающего тепла в воду в мае-июле составляет 31.6, а в мае-июне 21.4 ккал./см². Следовательно, в том и другом случае приблизительно около 15% всего поступающего тепла в воду расходуется на повышение ее температуры, 35% - на испарение, 25% - на эффективное излучение, 15% - на тепловой сток и по 5% на турбулентный теплообмен между атмосферой и поверхностью озера и передачу тепла водой донным отложениям.

Рассмотрим, как распределяется тепло между водой и донными отложениями в открытый период. Для этого сначала определим теплозапас водной массы оз. Кубенского на 1 мая и 1 ноября. По данным поста д. Коробово (за 1961-1973 гг.), температура воды (T_b) 2.3-3.0° при среднем уровне ($H_{ср}$) 3.00 м. Откуда следует, что теплозапас водной массы озера на 1 мая составляет 0.6-0.9 ккал./см², на 1 ноября - 0.5-0.6 ккал./см² (при $T_b = 2.5-2.9$ и $H_{ср} = 2.1$ м). Поэтому можно полагать, что в среднем за многолетний период теплозапас водной массы оз. Кубенского 1 мая и 1 ноября почти одинаков.

Из данных табл. 113 следует, что водная масса с августа по октябрь расходует тепла на 0.4 ккал./см² больше, чем накапливает его с мая по июль. В самом деле, через контакт с водой донные отложения получают с мая по август 1.4 ккал./см² и часть этого тепла - (0.3 + 0.2) = 0.5 ккал./см² - возвращают водной массе в сентябре - октябре, сохранив на последующие месяцы (ноябрь-апрель) 0.9 ккал./см².

Полученные выше результаты распределения тепла между водной массой и донными отложениями в мае-июле и августе-октябре служат подтверждением тому, что расчет их теплозапасов за мно-

голетний ряд в настоящее время может быть произведен с удовлетворительной точностью при наличии наблюдений над температурой воды и донными отложениями. В этом можно убедиться на ниже приведенных примерах, а также в результате выявленной репрезентативности данных поста д. Коробово по температуре воды за многолетний период (разд. 5.4, наст. изд.). Поскольку теплозапас донных отложений довольно консервативен и мало меняется от года к году, то его значение, полученное из непосредственных наблюдений над температурой за ряд лет (1972-1975 гг.), можно считать надежной величиной, включенной в тепловой баланс за многолетний ряд (табл. 113).

Анализ и сопоставление полученных результатов отдельных составляющих теплового баланса за многолетний период и отдельные расчетные годы позволяют установить некоторые возможные причины, определившие невязки между суммой положительных и отрицательных значений теплового баланса. Обратимся к данным за отдельные месяцы расчетных лет табл. 114. За май 1974 г. обнаружим невязку 5.5 ккал./см². Достаточно обоснованно можно сказать, что эта невязка получилась в результате того, что при расчете за май 1974 г. не учитывались затраты тепла на таяние льда, как и для других расчетных лет, а также и за многолетний период, из-за отсутствия соответствующих сведений. Однако из непосредственных наблюдений 28 апреля 1974 г. известно, что в указанный день лед в озере достигал 60 см толщины. Поэтому для его стаивания в мае было необходимо около 4.5 ккал./см². Если бы это обстоятельство при расчете было учтено, то указанная выше невязка за май 1974 г. снизилась до 1.0 ккал./см². Из выше приведенного примера можно заключить, что повышенное значение невязки за май многолетнего периода и май 1956 и 1974 гг. (табл. 113) обусловлено недочетом затрат тепла на таяние льда. Если обратиться к суммам положительных и отрицательных значений составляющих теплового баланса за другие месяцы отдельных лет, то также обнаружим значительные невязки между ними. Так, за июнь и июль 1956 г. они соответственно составили 4.9 и 3.0 ккал./см², а за июль и август 1973 г. - 2.9-4.9 ккал./см².

Анализ метеорологических условий за указанные месяцы свидетельствует о неустойчивости и резкой смене погоды в этот период. Именно поэтому можно предположить, что, кроме недостаточной точности исходных данных, на расчет составляющих теплового баланса, таких как L_E , V и R , оказывает влияние нарушение плавности хода гидрометеорологических условий, что влечет за собой невязки теплового баланса. Даже определение средней температуры воды, необходимой для вычисления теплозапаса, при очень резкой смене погодных условий в конце одного и в начале другого расчетных месяцев становится затруднительным без непосредственных наблюдений за температурой воды в озере. Для оз. Кубенского в таких случаях из ряда сопоставлений было выяснено, что наибо-

лее верное определение температуры воды на последний день месяца можно сделать, если воспользоваться графиком хода декадной температуры воды берегового поста с учетом установленных поправок (разд. 5.4, наст. изд.). Следует указать также, что при наибольшей средней глубине оз. Кубенского около 3.0 м ошибка в определении его температуры в 1° составит 0.3 ккал./см², а при указанных невязках (табл. 114), если их отнести к ошибке определения температуры воды озера, она выразилась бы 10–18°. Из этого примера видно, что невязки в расчете теплового баланса оз. Кубенского заложены в определении его основных составляющих, таких как В и LE.

В первом приближении можно разбросать невязку теплового баланса пропорционально абсолютным значениям составляющих теплового баланса, без учета их положительных и отрицательных знаков. В этом случае, например, невязка теплового баланса (1.8 ккал./см²) от суммы его составляющих за июнь (11.2+9.4 = 20.6 ккал./см²) многолетнего периода (табл. 113) составит 8.7%. Ошибка же в определении радиационного баланса В от указанной выше суммы равна 0.9 ккал./см², или 49.4% от всей невязки теплового баланса за указанный месяц, соответственно LE = 0.44 ккал./см², или 24.4%, и всех остальных составляющих – 26.2%. Если опираться на вышеизложенное соображение о том, что ошибка в определении теплозапаса воды и донных отложений мала по отношению к другим составляющим, и из указанной выше суммы 20.6 ккал./см² вычесть (1.3+0.5) = 1.8 ккал./см², то получим относительную ошибку в определении остальных составляющих за июнь, равную 11%. Если же подобный расчет произвести за октябрь (табл. 113), то получим, что точность расчета всех составляющих от их суммы (1.6+3.3 = 4.9 ккал./см²) равняется 35%, а без учета возможной ошибки в определении теплозапаса воды и донных отложений суммарная относительная ошибка оставшихся составляющих за октябрь равна 50%.

Сравним суммарные значения составляющих теплового баланса оз. Кубенского за период, свободный от льда, приведенные в табл. 113, с аналогичными данными для того же водоема, полученными А.П. Braslavskim и З.А. Викулиной (1964). Указанными авторами значения составляющих теплового баланса оз. Кубенского приводятся в процентах от поглощенной водой суммарной солнечной радиации: затраты тепла на испарение (LE) = 60.9%, эффективное излучение (Q_{3ff}) = 25.0%, турбулентный теплообмен с атмосферой (P) – 10.6% и теплообмен с дном (Q_r) – 3.5%. При соответствующем пересчете данных табл. 113 получим: LE = 42.9%, Q_{3ff} = 33.4%, P = 7.0%, Q_r = 1.7%. Кроме того, сумма притока и стока тепла с водой рек (Q_{np}=Q_{ct}) составляет 6.8%, а невязка δ – 8.2%. Если указанную невязку разбросать пропорционально абсолютным значениям составляющих теплового баланса, то они выражаются следующими величинами: LE = 46.7%, Q_{3ff} = 36.4%, P = 7.7%, (Q_{np}+Q_{ct}) = 7.4% и Q_r = 1.8%. Тогда, сравнивая

эти данные с данными А.П. Браславского и З.А. Викулиной, увидим, что у последних затраты тепла на испарение ниже на 14.2%, а эффективное излучение выше на 11.4%. Значения составляющих теплового баланса оз. Кубенского, представленные в последнем варианте, надо полагать, более точны за счет привлечения данных непосредственных наблюдений и совершенствования методики их расчета.

Составляющие теплового баланса оз. Кубенского за 1965 г. и за многолетний период можно также сравнить с аналогичными данными для Рыбинского водохранилища, приведенными в работе Е.А. Зайцевой (1968). Рыбинское водохранилище находится в 80 км к юго-западу от оз. Кубенского. Его площадь составляет около 4500 км^2 , а объем — 24 км^3 . Этот водоем в 9 раз пре-восходит оз. Кубенское по площади, в шесть раз по объему водной массы; его средняя глубина составляет приблизительно 5 м, что в 1.8 раз превышает аналогичную в оз. Кубенском. Однако по этому морфометрическому признаку, определяющему во многих отношениях формирование температурного режима водоемов, Рыбинское водохранилище и оз. Кубенское относятся к метатермическому классу эпiterмической группы (Тихомиров, 1970), что и сближает их по условиям формирования отдельных составляющих теплового баланса за одни и те же месяцы одного и того же года и за многолетний период.

Сопоставление их значений за 1956 г., приведенных в табл. 114 и в работе Е.А. Зайцевой (1965), показывает, что наибольшее приращение теплозапаса в обоих водоемах происходит в мае (3.9 и 5.3 ккал./см^2) вследствие большой роли теплового притока в этом месяце. Однако тепловой приток и сток в балансе Рыбинского водохранилища, как имеющие второстепенное значение, не учитывались. Отметим, что в 1956 г., как и в другие годы, наибольшие затраты тепла рассматриваемых водоемов были обусловлены испарением, и с мая по октябрь на оз. Кубенском они составили -17.3 , а для Рыбинского водохранилища -20.9 ккал./см^2 . В связи с резким похолоданием в июле 1956 г. оз. Кубенское в этом месяце снизило свой теплозапас, а теплозапас Рыбинского водохранилища в июле того же года увеличился при снижении температуры воды, по данным С.Н. Тачалова (1965), использованной Е.А. Зайцевой (1965) для расчета этого теплозапаса. К сожалению, при уточнении значений составляющих теплового баланса Рыбинского водохранилища за многолетний период, так же как и за отдельные годы, тепловой приток и сток не учитывался. Однако наибольшее увеличение теплозапаса водной массы в мае по сравнению с другими месяцами открытого периода является у мелководных озер характерной чертой, связанной со значительным преобладанием в них теплового притока над стоком, что подтверждается данными В.А. Кирилловой (разд. 5.3, част. изд.).

Отметив это важное обстоятельство, проследим теперь, в чем сходство и различие в значениях теплового баланса за много-

Таблица 115

Средние месячные значения составляющих теплового баланса
(в ккал./см²) Рыбинского водохранилища за многолетний период
(1948–1964 гг.) (по: Е.А. Зайцева, 1968)

	У	УІ	УІІ	УІІІ	ІХ	Х	Σ_{Y-X}
В	8.1	10.0	9.8	6.4	2.7	0.4	37.4
LE	-2.5	-6.0	-7.6	-6.9	-5.0	-2.9	-30.9
P	0.9	-0.7	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7	-5.4
ΔW_B	-5.0	-2.3	-0.4	2.0	3.5	3.4	1.2
ΔW_r	-1.1	-1.1	-0.6	-0.3	-0.4	0.2	-3.3
$\Sigma (+)$	9.0	10.0	9.8	8.4	6.2	4.0	47.4
$\Sigma (-)$	-8.6	-10.1	-9.7	-8.5	-6.9	-4.6	48.4
δ	0.4	-0.1	0.1	-0.1	-0.7	-0.6	-1.0

летний период оз. Кубенского (табл. 113) и Рыбинского водохранилища (табл. 115). Сумма радиационного баланса Рыбинского водохранилища (В) с мая по октябрь больше, чем у оз. Кубенского, на 2.2 ккал./см². Это различие невелико и, возможно, вызвано разницей в гидрометеорологических условиях этих водоемов. Средние месячные значения В за май–июнь оз. Кубенского выше на 0.1–0.2 ккал./см², чем Рыбинского водохранилища. Максимум В наступает на том и другом водоеме в июне. С июля по октябрь значения В Рыбинского водохранилища аналогичны значениям оз. Кубенского. В октябре В оз. Кубенского имеет отрицательное значение (-0.6 ккал./см²), а Рыбинского водохранилища – положительное (+0.4 ккал./см²). Обращает на себя внимание различие в сумме затрат тепла на испарение в 10.0 ккал./см². По Рыбинскому водохранилищу за 1956 г. оно выражается -20.9 ккал./см² и в среднем за многолетний период -30.9 ккал./см², для оз. Кубенского – соответственно -17.3 и -22.7 ккал./см². В последнем случае разность составила 5.4 ккал./см² вместо 10 ккал./см² для Рыбинского водохранилища и кажется более правдоподобной. Сходство данных по затратам тепла на испарение Рыбинского водохранилища и оз. Кубенского состоит лишь в том, что их максимумы приходятся на июль. Сходство значений турбулентного теплообмена выражается одинаковой направленностью теплопотока в мае от воды в атмосферу, а с июня по октябрь – от воды в воздух. По данным рассматриваемых таблиц 113 и 115 видим, что значения LE и P для Рыбинского водохранилища выше аналогичных для

оз. Кубенского и достигают с ними наибольших различий в сентябре-ноябре.

Как уже было отмечено выше, накопление теплозапаса (ΔW_f) рассматриваемыми водоемами наиболее энергично происходит в мае, прекращается в июле, а наибольшая потеря тепла водой приходится на сентябрь. Накопление тепла донными отложениями на оз. Кубенском происходит в мае-июле. В августе теплопоток между водой и дном сбалансирован, приращение теплозапаса грунта равно нулю (табл. 113). С сентября по октябрь донные отложения отдают воде 0.5 ккал./см², оставляя в запасе на последующие месяцы 0.9 ккал./см². На Рыбинском водохранилище аккумуляция тепла в донных отложениях продолжается с мая по сентябрь и составляет 3.5 ккал./см². Из указанного количества в октябре в воду переходит 0.2 ккал./см², а 3.3 ккал./см² остаются на последующие месяцы периода ледостава. Такое количество тепла, сохраняемое грунтом Рыбинского водохранилища, представляется чрезвычайно высоким. Используя график распределения температуры в грунте Рыбинского водохранилища у мыса Рожновского в 1962-1963 гг., по данным Тачалова (1968), мы определили, что приращение теплозапаса 10-метровым слоем донных отложений с мая по октябрь составляет 3.1 ккал./см² при условии, что объемная теплоемкость грунта равна единице. Полученная величина теплозапаса близка к данным, приведенным в табл. 115, как возможная величина аккумулированного тепла за теплый период. Однако объемная теплоемкость 10-метрового слоя грунта Рыбинского водохранилища вряд ли превосходит таковую оз. Кубенского, как недавно образованного водоема, по существу, без накопления органического вещества в донных отложениях, т.е. не может быть больше 0.7 ккал./см³. град. При такой объемной теплоемкости теплозапас грунта Рыбинского водохранилища, аккумулированный на зиму, будет равен 2.2 ккал./см², вместо 3.5 ккал./см², по данным Е.А. Зайцевой (1968). Полученное нами значение теплозапаса грунта Рыбинского водохранилища также велико, но возможно, если действительно теплоактивный слой донных отложений определяется не трехметровым слоем, как это принято нами (разд. 5.4. наст. изд.) и другими исследователями (Форш, 1968), а мощным 10-метровым слоем.

Переходя к тепловому балансу, в целом можно отметить, что полученные невязки сумм составляющих теплового баланса Рыбинского водохранилища за каждый месяц многолетнего периода (табл. 115) на порядок меньше, чем на оз. Кубенском (табл. 113). Таким образом, для Рыбинского водохранилища составляющие теплового баланса, казалось бы, получены с очень высокой точностью. Е.А. Зайцева (1968) считает, что при расчете составляющих теплового баланса методом ГГО невязки теплового баланса составляют не более 5%, а методом ГГИ - 20-50%. Однако если в урав-

нение теплового баланса Рыбинского водохранилища были бы включены величины теплового притока и стока, разность которых за открытый период по примеру оз. Кубенского сравнима с турбулентным теплообменом за тот же промежуток времени, то, очевидно, результаты расчета теплового баланса Рыбинского водохранилища приобрели бы иные значения.

ЛИТЕРАТУРА

- А брамова Т.Г. Болота Вологодской области, их районирование и сельскохозяйственное использование. - В кн.: Северо-запад европейской части СССР, вып. 4. Л., 1965, с. 65-92.
- Аверкиев М.С. Суммарная радиация и ее компоненты при безоблачном небе в зависимости от прозрачности атмосферы для широт 40-70°. - Вестн. МГУ, сер. геогр., 1958, № 4, с. 185-198.
- Агроклиматические ресурсы Вологодской области. Л., 1972. 185 с.
- Адаменко В.Н. Методы решения проблем изменения теплового режима некоторых естественных и искусственных деятельных поверхностей. Автореф. докт. дис. М., 1975. 58 с.
- Анисимова Е.П. Исследование объемного поглощения солнечной радиации в Учинском водохранилище. - Вестн. МГУ, сер. физ. и астроном., 1965, № 6, с. 37-42.
- Антипов Н.П. Климат. - В кн.: Природа Вологодской области. Вологда, 1957, с. 111-135.
- Арсеньева Н.М., Давыдов Л.К., Дубровина Л.Н., Конкина Н.Г. Сейши на озерах СССР. Л., 1963. 183 с.
- Архипова Е.Т. Тепловой баланс Каспийского моря. - Тр. Гос. океаногр. ин-та, вып. 35, 1957, с. 3-101.
- Ауслендер В.Г., Гей В.П. История развития Кубено-Сухонской озерной впадины в плейстоцене и голоцене. - В кн.: Материалы II симпоз. по истории озер СССР. Минск, 1967, с. 10-13.
- Афанасьев А.Н. Водный баланс оз. Байкал. - Тр. Байкальск. лимнол. ст., 1960, т. 18, с. 155-241.
- Бакастов С.С. Режим грунтовых вод в прибрежной зоне Рыбинского водохранилища. - Бюл. Ин-та биол. внутр. вод, 1959, № 4, с. 49-54.
- Бакастов С.С. Теплофизические характеристики затопленных грунтов. - Тр. Ин-та биол. внутр. вод, 1966, вып. 13 (16), с. 84-95.
- Барашкова Е.П., Гаевский В.Л., Дьяченко Л.Н. и др. Радиационный режим территории СССР. Л., 1961. 528 с.
- Бандат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., 1971. 408 с.
- Берг Л.С. Аральское море. Опыт физико-географической монографии. - Изв. Туркменск. отд. РГО, 1908, т. У. 580 с.
- Берлянд Т.Г. Распределение солнечной радиации на континентах. Л., 1961. 226 с.
- Берлянд Т.Г. Изменчивость солнечной радиации, поступающей к поверхности Земли. - Тр. РГО, 1965, вып. 179, с. 28-40.
- Боровский Р.В. Растительный покров. - В кн.: Природа Вологодской области. Вологда, 1957, с. 210-299.
- Богословский Б.Б. Озероведение. М., 1960, 335 с.

- Б о г о с л о в с к и й Б.Б. Классификация водных объектов по водообмену и водным массам. - Вестн. БГУ, сер. 11, 1971, № 3, с. 75-78.
- Б о г у с л а в с к и й С.Г. Поглощение солнечной радиации в море и его непосредственное влияние на изменение температуры моря. - Тр. Морск. гидрофиз. ин-та АН СССР, 1956, т. VIII, с. 80-97.
- Б о ж и ч П.К., Д ж у н к о в с к и й Н.Н. Морское волнение и его действие на сооружения и берега. М., 1949. 336 с.
- Б о р и с о в А.А. О климатообразующих факторах природы Вологодской области. - Вестн. ЛГУ, 1958, № 18, с. 114-124.
- Б р а с л а в с к и й А.П. Расчет ветровых волн. - Тр. ГГИ, 1952, вып. 35(89), с. 94-158.
- Б р а с л а в с к и й А.П., В и к у л и н а З.А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. Л., 1954. 212 с.
- Б у г а е в В.А. Колебания климата и климатообразующие процессы. - Метеорол. и гидрол., 1964, № 12, с. 3-8.
- Б у с л а е в а А.А., Ф е д о т о в а Т.Н. Воды дочетвертичных отложений. - В кн.: Гидрогеология СССР. Т. XLIY. Архангельская и Вологодская обл. М., 1969, с. 104-201.
- В е р б о л о в В.И., С о к о л ь н и к о в В.М., Ш и м а р а е в М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.-Л., 1965. 360 с.
- В е с е л о в а М.Ф. Роль речных вод в тепловом балансе Ладожского озера. - Тр. Лаб. озероведения, 1968, т. XXII, с. 218-222.
- В и л е н с к и й Я.Г., Г л у х о в с к и й Б.Х. Некоторые закономерности ветрового волнения. - Тр. ГОИН, 1955, вып. 29(41), с. 5-35.
- В о д н ы е ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л., 1967, 199 с.
- В о л ь ф И.В., Т к а ч е н к о Н.И., Я к о в л е в а О.Н. Методы контроля сточных вод целиULOЗНО-бумажного производства при их очистке. М., 1971. 156 с.
- В о р о б ь е в Н.И. Применение измерений электропроводности для характеристики химического состава природных вод. М., 1963. 143 с.
- В о р о н ц о в Ф.Ф. Волнение на Ладожском озере. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 247-264.
- В о р о н ц о в Ф.Ф. Волнение на озере. - В кн.: Кубенское озеро. Л., 1974, с. 14-15.
- В о р о н ц о в Ф.Ф. Формирование режима динамики вод озера. - В кн.: Биологическая продуктивность оз. Красного. Л., 1976, с. 37-48.
- Г е р м а н В.Х. Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток. - Тр. ГОИН, 1970, вып. 103, с. 52-73.
- Г и р с А.А. Особенности колебания циркуляции атмосферы в отдельных месяцах года. - Метеорол. и гидрол., 1959, № 12, с. 23-28.
- Г и р с А.А. Тепловой режим Советской Арктики при основных формах атмосферной циркуляции. - Метеорол. и гидрол., 1966, № 10, с. 19-23.
- Г и р с А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных гидрометеорологических прогнозов. Л., 1974. 487 с.

- Григорьев С.В. О некоторых определениях и показателях в озероведении. - В кн.: Материалы по гидрологии (лимнология) Карелии. Петрозаводск, 1958, с. 29-46.
- Давтян Н.А. Расчет трансформации речной струи в водореме. - Тр. ГГИ, 1974, вып. 210, с. 155-162.
- Давыдов Л.К. Гидрография СССР. Ч. 1. Л., 1953, 184 с.
- Дзердзевский Б.Л. Проблема общей циркуляции атмосферы и климата. - В кн.: А.И. Войков и современные проблемы климатологии. Л., 1956, с. 109-122.
- Долгов Г.И. Определение удельной электропроводности в практике водных исследований. М., 1954, 47 с.
- Евсеев Л.К. Связь атмосферных осадков с суммарной радиацией, испарением и абсолютной влажностью. - Метеорол. и гидрол., 1958, № 10, с. 18-23.
- Живаго А.В. Современные геоморфологические процессы на берегах Кубенского озера и Рыбинского водохранилища. - Тр. Ин-та океанологии АН СССР, 1954, т. X, с.
- Зайков Б.Д. Гидрологический очерк бассейна оз. Севан. - В кн.: Материалы по иссл. оз. Севан и его бассейна. Ч. 1, вып.-3. Л., 1933. 119 с.
- Зайков Б.Д. Очерки по озероведению. Ч. 1. Л., 1955, 271 с.
- Зайцев А.С., Тимофеев М.П. Изменение скорости ветра под влиянием ограниченных водоемов. - Тр. ГГО, 1967, вып. 206, с. 9-13.
- Зайцева Е.А. Тепловой баланс Рыбинского водохранилища. - В кн.: Сборник работ Рыбинской ГМО. Вып. 2, Л., 1965, с. 72-91.
- Зайцева Е.А. Уточнение составляющих теплового баланса Рыбинского водохранилища. - В кн.: Сборник работ Рыбинской ГМО. Вып. 4. Л., 1968, с. 11-21.
- Иванов К.И. О зависимости между содержанием взвешенных частиц и коэффициентом ослабления света в морской воде в присутствии окрашенных гуминовых веществ. - Тр. ГОИН, 1950, вып. 15(27), с. 39-48.
- Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск, 1969, 592 с.
- Изотова А.Ф. Некоторые особенности климата Онежского озера. - В кн.: Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973, с. 25-51.
- Изотова А.Ф. Режим метеорологических элементов в приводном слое и расчеты теплопотерь с поверхности Онежского озера. - В кн.: Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973, с. 135-188.
- Карашев А.В. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. Л., 1960. 216 с.
- Кириллова В.А. Тепловой приток и сток Онежского озера. - В кн.: Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973, с. 189-201.
- Кириллова В.А. Характеристика притока озера. - В кн.: Кубенское озеро. Л., 1974, с. 9-11.
- Кириллова Т.В. Радиационный режим озер и водохранилищ. Л., 1970. 251 с.
- Кленова М.В. К методике исследования взвешенных частиц веществ морской воды. - Тр. ГОИН, 1952, вып. 11, с. 162-191.
- Кожевников М.П. Гидравлика ветровых волн. М., 1972. 263 с.
- Кондратьев Н.Е. Расчеты ветрового волнения и переформирования берегов водохранилища. Л., 1953. 109 с.

- Копанев И.Д. Краткая характеристика условий испарения со снежно-го покрова на равнинной территории СССР. - Тр. ГГО, 1967, вып. 214, с. 114-121.
- Корытникова Н.Н. Термическое взаимодействие дна и водных масс Байкала. - Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1940, № 3, с. 393-400.
- Корытникова Н.Н. О прогнозе зимних температур в непроточных водоемах. - Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1940, № 6, с. 849-864.
- Кузин П.С. Циклические колебания стока рек северного полушария. Л., 1970. 178 с.
- Кузьмин П.П. Радиация, отраженная от поверхности моря и поглощенная слоями воды различной глубины. - Метеорол. и гидрол., 1939, № 7-8, с. 3-11.
- Курочкина А.А. Грунты озера. - В кн.: Кубенское озеро. Л., 1974, с. 19-20.
- Лабзовский Н.А. Об определении элементов волн. - Тр. ГГИ, 1952, вып. 35(89), с. 159-164.
- Лебедев В.В. Подземные воды. - В кн.: Природа Вологодской области. Вологда, 1957, с. 97-110.
- Лисицын А.П. Методы сбора и исследования водной взвеси для геологических целей. - Тр. ИОАН, 1956, т. XIX, с. 204-231.
- Литвинов А.С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами БПВ-2р. - Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР, 1968, вып. 16 (19), с. 259-268.
- Малинина Т.И. Сейши Ладожского озера. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 229-246.
- Малинина Т.И. Водный баланс Ладожского озера. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 182 203.
- Малинина Т.И., Солнцева Н.О. Сейши Онежского озера. - В кн.: Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972, с. 40-73.
- Малинина Т.И., Татаринова Т.А. Уровенный режим и водный баланс. - В кн.: Кубенское озеро. Л., 1974, с. 11-13.
- Матушевский Г.В. Расчет объема осадков, выпадающих на Азовское соре. - Метеорол. и гидрол., № 8, 1960, с. 34-37.
- Метеорологический ежемесячник. Вып. 1. Архангельск, 1966-1973.
- Методические указания по определению характеристик прозрачности атмосферы для актинометрических отделов гидрометеорологических обсерваторий. Л., 1965. 36 с.
- Мичурин А.Н., Казарьян В.В. Программа корреляционного и спектрального анализов. - Тр. ГИНРО, 1972, т. 85, чч. II-V, с. 189-267.
- Мокиевский К.А., Kovalevskaya P.З., Михеева Т.М. Распространение солнечной радиации в водной толще озер и эффективность ее утилизации планктоном. - В кн.: Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах. Минск, 1974, с. 165-171.
- Мокиевский К.А. Радиационный баланс Онежского озера. - В кн.: Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973, с. 52-134.
- Натрус А.А. К вопросу об оценке осадков как слагаемого водного баланса водохранилищ и озер. - Тр. ГГИ, 1964, вып. 113, с. 119-130.

- Н а т р у с А.А., М у х а ч е в а И.А. Уточнение величины осадков применительно к расчету водного баланса оз. Байкал. - Тр. ГГИ, 1973, вып. 203, с. 34-48.
- Н е с и н а Л.В. Об определении температуры поверхностного слоя водоемов в период вскрытия. - Тр. ГГО, 1970, вып. 271, с. 3-14.
- Н е ж и х о в с к и й Р.А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ и озер. Л., 1961. 292 с.
- Н е х а й ч и к В.П. Влияние колебания увлажненности территории Северо-Запада европейской части СССР на водный баланс озер. - Вестн. ЛГУ, 1964, № 24, вып. 4, с. 115-121.
- Н е х а й ч и к В.П. Многолетние фазовые изменения водного баланса озер. - В кн.: Круговорот веществ и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, 1975, с. 263-265.
- О б о л е н с к и й В.Н. Сейши и их теория. - Зап. по гидрогр., 1919, т. 43, вып. 2, с. 13-76.
- О в ч и н и к о в а А.И. Типы вегетационных периодов на территории Северо-Запада РСФСР в связи с характером циркуляции атмосферы. - В кн.: Северо-Запад европейской части СССР. Вып. 5. Л., 1966, с. 3-12.
- О с м о л о в с к а я Е.В. Оценка теплового притока и стока на оз. Байкал. - Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР, 1964, т. У (XXV), с. 136-138.
- О с н о в н ы е гидрологические характеристики. Т. З. Северный край. Л., 1966. 394 с.
- О х л о п к о в а А.Н. Течения Ладожского озера. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 265-279.
- О х л о п к о в а А.Н. Течения Онежского озера. - В кн.: Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972, с. 74-113.
- П а н о в а З.П. Воды четвертичных отложений. - В кн.: Гидрогеология СССР. Т. XLIV. Архангельская и Вологодская обл. М., 1969, с. 79-103.
- П а х т у с о в а Н.А. Геологическое строение. - В кн.: Гидрогеология СССР. Т. XLIV. Архангельская и Вологодская обл. М., 1959, с. 37-60.
- П и в о в а р о в А.А. Термика замерзающих водоемов. М., 1972. 139 с.
- П и в о в а р о в А.А., Л а в о р к о В.С. Об ослаблении солнечной радиации по вертикали в море. - Вестн. МГУ, сер. физ. и астроном., 1960, № 6, с. 59-63.
- П и в о в а р о в а З.И. Радиационный режим при ясной погоде. - Тр. ГТО, 1959, вып. 96, с. 84-100.
- П и в о в а р о в а З.И. Многолетние изменения интенсивности солнечной радиации по наблюдениям актинометрических станций. - Тр. ГТО, 1968, вып. 223, с. 17-37.
- П и в о в а р о в а З.И. Распределение коэффициента прозрачности атмосферы (для интегрального потока) по территории СССР. - Тр. ГТО, 1968, вып. 213, с. 105-121.
- П и в о в а р о в а З.И. Вековой ход прямой солнечной радиации. - Тр. ГТО, 1975, вып. 338, с. 39-60.
- П о л о в О.В., С у б о ч В.В. Подземный сток. - В кн.: Гидрогеология СССР. Т. XLIV. Архангельская и Вологодская обл. М., 1969, с. 202-209.

- П р о н и н А.Г. Изменчивость элементов водного баланса крупных озер Северо-Запада европейской части СССР. – В кн.: Тр. Всесоюз. симпоз. Т. 1. Режим озер. Вильнюс, 1970, с. 303–312.
- П р о н и н А.Г. Особенности водного баланса крупных озер Северо-Запада европейской части СССР. – В кн.: Северо-Запад. Вып. 8. Л., 1972, с. 25–41.
- Р е м е з о в а М.В. Сейши Аральского моря. – Тр. ГГИ, 1937, вып. 5, с. 90–151.
- Р е с у р с ы поверхности вод СССР. Т. 3. Северный край, Л., 1972. 661 с.
- Р о ж к о в В.А. О выборочной изменчивости спектральных характеристик морского волнения. – В кн.: Теоретические и практические вопросы мореходных качеств судов. Л., 1967, с. 219–235.
- Р о ж к о в В.А., Т раб е з н и к о в Ю.А. Методические рекомендации, алгоритмы программы расчета вероятностных характеристик ветрового волнения на ЭВМ. Л., 1969, 397 с.
- Р у б и н ш т е й н Е.С. К проблеме изменения климата. – Тр. НИУ ГУГМС, сер. 1, 1946, вып. 22, 54 с.
- Р у к о в о д с т в о по расчету параметров ветровых волн. Л., 1969. 138 с.
- Р у м я н ц е в В.Б. Гидрооптическая характеристика водного тела Онежского озера. – В кн.: Динамика водных масс Онежского озера. Л., 1972, с. 114–158.
- Р у т к о в с к а я В.А. Проникновение солнечной радиации в водоемы суши и моря. – Тр. Ин-та океанол. АН СССР, 1965, вып. 78, с. 255–274.
- С а в и н а В.Д. Водный баланс Рыбинского водохранилища. – В кн.: Сборник работ Горьковской, Волжской и Рыбинской ГМО. Вып. 10. Л., 1973, с. 154–173.
- С а в и н о в Ю.А. Четвертичные отложения Архангельской и Вологодской областей и их водоносность. – В кн.: Северо-Запад европейской части СССР. Вып. 4. Л., 1965, с. 54–64.
- С а д о к о в К.А. Геология и полезные ископаемые. – В кн.: Природа Вологодской области. Вологда, 1957, с. 8–58.
- С и в к о в С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л., 1968. 231 с.
- С м и р н о в а Н.П. Радиационный баланс Ладожского озера. – Тр. Лаб. озероведения ЛГУ, 1968, т. XII, с. 5–72.
- С м и р н о в а Н.П. Тепловой баланс Ладожского озера за навигационный период. – Тр. Лаб. озероведения ЛГУ, 1968, т. XII, с. 223–233.
- С м и р н о в а Н.П., К о н о в а л о в а Л.Д. Изменчивость суммарной радиации на территории Казахского мелкосопочника и прилежащих степей. – В кн.: Озера Казахстана и Киргизии и их история. Л., 1975, с. 121–145.
- С о к о л о в а Е.М. Термический режим рек СССР. – Тр. ГГИ, 1951, вып. 30(84). 116 с.
- С о л л е р т и н с к и й Е.С. Река Кубена. Географический очерк. Вологда, 1922. 55 с.
- С о л о в ѿ в е в В.Н., Ш о с т а к о в и ч В.Б. Сейши озера Байкал. – Тр. Иркутск.магнит. и метеорол. обсерв., 1926, № 1, с. 56–61.
- С о с к и н И.М. Эмпирические зависимости для расчета ветровых течений. – Тр. ГОИН, 1962, вып. 70, с. 3–28.

- Справочник по климату СССР. Вып. 1. Ч. 1. - 1965, ч. 2 - 1965, ч. 3 - 1967, ч. 4 - 1968, ч. 5 - 1968. Л.
- Стеблин-Каменская О.С. Морфометрическая карта Вологодской области. - Вестн. ЛГУ, 1962, № 24, вып. 4, с. 124-131.
- Сумароков В.С. Средняя многолетняя амплитуда уровней воды в озерах северной части СССР. - Метеорол. и гидрол., 1947, № 6, с. 72-73.
- Тараканов Г.Г. К вопросу об изменении скорости ветра при переходе с суши на водную поверхность. - Тр. ЛГМИ, 1958, вып. 8, с. 113-128.
- Тачалов С.Н. Расчет средней температуры воды и теплосодержания Рыбинского водохранилища. - В кн.: Сборник работ Рыбинской ГМО. Вып. 2. Л., 1965, с. 61-67.
- Тачалов С.Н. Методика и результаты наблюдений над температурой грунтов дна Рыбинского водохранилища. - В кн.: Сборник работ Рыбинской ГМО. Вып. 3. Л., 1966, с. 3-16.
- Тачалов С.Н. Теплообмен воды с грунтами дна Рыбинского водохранилища. - В кн.: Сборник работ Рыбинской ГМО. Вып. 4. Л., 1968, с. 3-10.
- Технические указания по расчету испарений с поверхности водоемов. - В кн.: Материалы Междувед. совещ. по пробл. изуч. испарения с водной поверхности. Л., 1969, с. 5-95.
- Тимофеев М.П. Метеорологический режим водоемов. Л., 1963, 290 с.
- Тихомиров А.И. Сейшевые течения в проливах Якимвартского залива Ладожского озера (наблюдения 1957 г.). - ДАН СССР, 1958, т. 121, с. 149-151.
- Тихомиров А.И. О термическом баре в Якимвартском заливе Ладожского озера. - Изв. ВГО, 1959, т. 91, с. 424-438.
- Тихомиров А.И. Расчет средних месячных температур поверхности воды Ладожского озера. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 279-323.
- Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера. - В кн.: Тепловой режим Ладожского озера. Л., 1968, с. 144-217.
- Тихомиров А.И., Малинина Т.И. Некоторые данные о сейшевых течениях в Онежском озере. - В кн.: Предвар. результ. работ компл. экспед. по исслед. Онежского озера. Вып. 3. Петрозаводск, 1969, с. 21-24.
- Тихомиров А.И. Классификация озер умеренной зоны по термическому режиму. - В кн.: Тр. Всесоюз. симпоз. Т. 1. Режим озер. Вильнюс, 1970, с. 174-185.
- Тихомиров А.И. Температура воды, теплозапасы, тепловой баланс и термический режим Онежского озера. - В кн.: Тепловой режим Онежского озера. Л., 1973, с. 202-323.
- Тихомиров А.И., Егоров А.Н. Температурный режим озера и его возможные изменения. - В кн.: Кубенское озеро. Л., 1974, с. 7-9.
- Тихомиров А.И., Егоров А.Н. Термический режим. - В кн.: Озера Лача и Воже. Л., 1975, с. 8-10.
- Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М., 1960. 127 с.

- Филатова Т.Н. Исследование течений в озерах и водохранилищах. Л., 1962, 319 с.
- Филенко Р.А. Воды Вологодской области. Л., 1966, 131 с.
- Фортунатов М.А. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима. - Тр. ин-та биол. водохранилищ, 1959, вып. 2(5), с. 246-359.
- Форш Л.Ф. Термический режим, тепловой баланс озер и роль иловой толщи в их тепловом бюджете. - В кн.: Озера различных ландшафтов Северо-Запада СССР. Ч. 1. Л., 1968, с. 166-208.
- Хатчинсон Д. Лимнология. М., 1969. 592 с.
- Шнитников А.В. Современное состояние Юго-Востока европейской части СССР с точки зрения внутривековых колебаний климата и его общей увлажненности. - В кн.: Малые водоемы равнинных областей СССР и их использование. М.-Л., 1961, с. 23-31.
- Шнитников А.В. Внутривековые колебания уровня крупных озер Прибалтики в связи с другими компонентами географической среды. - Тр. VII науч. конф. по изуч. внутр. водоемов Прибалтики. М.-Л., 1962, с. 12-23.
- Шнитников А.В. Внутривековая изменчивость общей увлажненности бассейна Ладожского озера. - В кн.: Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л., 1966, с. 5-57.
- Шпак И.С. Изменение метеорологических элементов при натекании воздушного потока на водоем. - В кн.: Сборник работ Цимлянской ГМО. Вып. 1. Л., 1958, с. 105-134.
- Шулейкин В.В. Физика моря. М., 1968. 1083 с.
- Яковлев Б.А. Климат Мурманской области. Мурманск, 1961. 183 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение (Т.И. Малинина, И.М. Распопов)	3
Глава 1. Природные условия бассейна оз. Кубенского (М.Ф. Веселова)	5
Глава 2. Климатические условия района озер Лача, Воже и Кубенского (А.Ф. Изотова)	16
Глава 3. Водный баланс и уровенный режим оз. Кубенского 48 3.1. Водный режим рек-притоков (В.А. Кириллова) 48 3.2. Осадки и испарение (А.Ф. Изотова) 77 3.3. Водный баланс (Т.И. Малинина) 85 3.4. Уровенный режим (Т.А. Татаринова) 104	
Глава 4. Динамика водных масс оз. Кубенского 118 4.1. Режим волнения (Ф.Ф. Воронцов) 118 4.2. Течения и внутренний водообмен (А.Н. Охлопкова) 130 4.3. Сейши (Т.И. Малинина) 154 4.4. Прозрачность воды (В.Б. Румянцев) 168 4.5. Электропроводность воды (М.Ф. Веселова) 176	
Глава 5. Тепловой режим и баланс оз. Кубенского 187 5.1. Радиационный баланс и проникающая радиация (Э.М. Горелова) 187 5.2. Потери тепла на испарение и турбулентный теплообмен с атмосферой (А.Ф. Изотова) 231 5.3. Тепловой приток и сток (В.А. Кириллова) 247 5.4. Термический режим и теплозапасы (А.И. Тихомиров, А.Н. Егоров) 257 5.5. Тепловой баланс (А.И. Тихомиров) 286	
Литература	298