

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ  
РОЛЬ  
ЛЕСНЫХ  
ГЕОСИСТЕМ

Ответственный редактор  
доктор географических наук В. А. Сытко



НОВОСИБИРСК  
«НАУКА»  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
1989

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема влияния леса на гидрологические процессы в течение многих лет остается дискуссионной, несмотря на большие усилия многих ученых найти ее решение. Еще Ф. Энгельс в своем фундаментальном исследовании «Диалектика природы» сформулировал вывод о многогранном и неоднозначном взаимодействии леса и вод: «Когда альпийские итальянцы вырубали на южном склоне леса, так заботливо охраняемые на северном, они не предвидели... что этим на большую часть года оставят без воды свои источники с тем, чтобы в период дождей эти источники могли изливаться на равнину тем более бешеные потоки»\*.

В настоящее время актуальность этой проблемы приобретает особое значение. Ежегодно вырубаются сотни тысяч гектаров леса, проводятся различные мероприятия по лесовосстановлению, созданию защитных полос и водоохранных зон. Вследствие этого происходит значительное преобразование гидрологических процессов, зачастую имеющее негативный характер. Так, общий сток с больших территорий за годовые интервалы времени может не меняться, в то же время наблюдается перераспределение речного стока во времени и пространстве. В периодической печати, в научных материалах фиксируются исчезновения сотен малых рек и потеря качества вод многих тысяч водотоков. Лесохозяйственные мероприятия повышают интенсивность эрозионных процессов, а лесовосстановление не всегда приводит к оптимизации гидрологического режима.

Значительные усилия ученых разных стран в области лесогидрологических исследований позволили получить большой объем информации о гидрологических процессах в различных типах леса и географических зонах. Продолжает развиваться методическая база, сделаны серьезные научные обобщения. Свидетельством внимания к проблеме со стороны науки служат многие сотни публикаций, вышедшие в свет особенно в последнее время. В то же время противоречивость полученных разными исследователями результатов сохраняется. Причины этого кроются как в методических ошибках, так и в стремлении авторов к однозначным оценкам роли отдельных типов леса.

Представляется, что одним из эффективных способов изучения гидрологических свойств лесных геосистем может стать ландшафтно-

---

\* Энгельс Ф. Диалектика природы. — М.: Госполитиздат, 1951. — С. 153.

гидрологический метод, предложенный в 30-х гг. В. Г. Глушковым. В соответствии с ним гидрологические процессы рассматриваются как продукт не только климата, но и всего ландшафта. Применительно к лесогидрологическим вопросам этот метод позволяет описывать всю совокупность факторов формирования процессов в лесу с вычленением из них прямой и косвенной роли лесной растительности. Предполагается на новой геосистемной основе дать представление и об объекте исследования. Как правило, в качестве объектов авторы избирают самые различные по характеру и пространственной размерности природные образования: биогеоценоз, лес в пределах речного бассейна и временного водотока. Анализируются гидрологические процессы в географической зоне или подзоне (например, южная тайга или лесная зона ЕТС). Тем самым уже на первом этапе исследований закладываются совершенно не сравнимые между собой подходы к изучению процессов, поскольку значение отдельных факторов формирования воднобалансовых элементов для каждого пространственного уровня анализируемых объектов будет иметь свою специфику.

Наиболее обоснованным в решении поставленных задач может стать системное представление об организации природной среды, в том числе лесных территорий, предложенное В. Б. Сочавой [1978, 1980]. Применение системной концепции открывает ряд новых возможностей в решении лесогидрологических проблем. Она позволяет сопоставить пространственный уровень лесной геосистемы и гидрологические закономерности, им свойственные, наметить пути перехода от описания процессов природных систем низкого уровня к процессам более высокого, унифицировать описание объекта на основе его комплексного анализа. Причем комплексное описание геосистемы должно быть дополнено компонентной детализацией, прежде всего подробной характеристикой лесной растительности с включением таксационных, биометрических, биогеографических и других показателей.

Новые возможности открывает применение ландшафтно-гидрологического метода при определении влияния хозяйственных мероприятий в лесу на гидрологические процессы. Он позволяет разработать наиболее объективные способы оценки воздействия каждого вида хозяйственной деятельности на такие элементы, как сток, испарение, фильтрация, применительно к определенному типу леса или геосистеме более высокой пространственной размерности. В то же время он дает возможность наметить пути познания физической сущности процессов преобразования закономерностей формирования воднобалансовых элементов и осуществления его моделирования.

Обращение к проблеме связано с необходимостью развития собственно ландшафтно-гидрологического направления, прежде всего для детализации функционально-гидрологического анализа геосистем. В области лесогидрологических исследований, как в никакой другой, накоплены большой опыт и данные о гидрологических свойствах и функциях наиболее сложно организованного природного комплекса — лесного. Естественно, что использование этих материалов значительно обогатит и ландшафтное направление в гидрологии.

В предлагаемой монографии рассмотрены четыре группы вопросов, взаимодополняющие и развивающие друг друга: методические аспекты лесогидрологических исследований; гидрологические свойства лесных геосистем различных географических зон страны; влияние на эти свойства лесохозяйственных мероприятий и использование их в практике. В ее подготовке приняли участие большое число специалистов разных научных и проектных учреждений, имеющих свои взгляды на проблему, использующие разные методы исследований и техническое обеспечение. С одной стороны, это обеспечило определенную объективность в решении поставленных задач, а с другой — не позволило достичь желаемого единобразия в изложении материала. Многолетние исследования создают реальную основу для перехода от этапа качественной констатации к созданию расчетных схем и математических моделей. Данные исследований могут быть использованы в экспертизе лесохозяйственных проектов, особенно в проектировании водоохранных зон, лесомелиорации, улучшении питания подземных, прежде всего артезианских вод.

Следует отметить, что в некоторых разделах можно выявить определенные противоречия в выводах и даже в фактическом материале. Причины этого указаны в разд. 1.1, но главной из них, как нам представляется, можно считать отсутствие хорошей приборной базы для изучения всех, а не отдельных воднобалансовых элементов. До настоящего времени не создано точных приборов для определения транспирации растительными сообществами, оценки внутрипочвенного и грунтового стока, фильтрации; измерение влажности почвы, как и прежде, основано на простом, но крайне трудоемком термовесовом способе.

Экспериментальные лесогидрологические исследования, и прежде всего воднобалансовые работы, относятся к сложным, дорогостоящим и трудоемким. Каждая из полученных величин — это длительный труд специалиста-гидролога, наблюдателя. Поэтому необходимо очень внимательно подходить к вопросам организации этих работ, детально прорабатывать поставленную задачу во всех ее аспектах, избирая наиболее эффективный путь ее решения. Ландшафтно-гидрологический метод может стать одним из возможных подходов. К сожалению, в полной мере его возможности в данной работе показать не удалось. В ряде случаев авторы разделов ориентировались на традиционную интерпретацию полученных результатов. Читателю предлагается самостоятельно проанализировать предложенный материал с позиций, рассмотренных в предисловии, и сделать нужные для себя выводы.

Идея создания коллективной монографии и организация ее издания принадлежат сотруднику Института географии СО АН СССР А. Н. Антипову. Большое участие в работе приняли сотрудники Валдайского филиала ГГИ С. Ф. Федоров и С. В. Марунич. Совместно с ними проработана структура монографии, подготовлены вводные части к главам. Мы благодарны всем специалистам, откликнувшимся на предложение и приславшим тексты разделов. Особую благодарность авторы выносят профессору В. А. Сытко, принявшему на себя нелегкую обязанность ответственного редактора.

---

## Г л а в а 1

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

История лесогидрологических исследований насчитывает более ста лет. И на всех ее этапах происходила последовательная разработка методов и приемов изучения гидрологической роли леса. К настоящему времени собран большой объем информации, которая не всегда позволяет дать объективную оценку гидрологических процессов в различных по типу и пространственной размерности объектах. Причин этому много, они рассмотрены в разд. 1.1. К основной следует отнести отсутствие полного и унифицированного описания лесных геосистем. Одним из путей преодоления этого недостатка может служить ландшафтное картографирование и ландшафтно-гидрологический анализ, позволяющие комплексно и на единой методической основе описать анализируемый объект (см. разд. 1.2).

Ведущим приемом определения гидрологической роли леса было и остается сравнение элементов водного баланса речных бассейнов с разной лесистостью, или лесных и безлесных геосистем, имеющих сходство в других природных компонентах. При этом важен выбор метода оценки воднобалансовых составляющих, в том числе приборов или других способов экспериментального измерения гидрологических характеристик, что особенно существенно ввиду незначительных отличий значений осадков и испарения в лесу и поле, составляющих, как правило, не более 10—15 %, в то время как ошибка определения элементов может быть значительно больше. К сожалению, по сравнению с предшествующими годами в настоящее время не произошло принципиального изменения к лучшему в области гидрологического приборостроения, что существенно сдерживает дальнейшее развитие лесогидрологических исследований. Достаточно напомнить о недостатках в работе почвенных испарителей типа ГГИ-500-50 и ГГИ-500-100, нарушающих естественное протекание процессов водообмена. Стоковые и воднобалансовые площадки часто организуются с серьезными нарушениями природного режима дrenирования, что приводит к завышению в оценках объемов стока в геосистемах. Нельзя сказать, что введение поправок в данные осадкомерной сети достаточно обоснованы для всех районов исследования. Единственно возможный путь улучшения создавшейся ситуации — это разработка принципиально новых путей воднобалансовых исследований на базе автоматизированных систем сбора и обработки гидрометеорологической информации, имеющих высокоточные дат-

чики, преобразующие сигналы датчиков устройства и носители с большой емкостью памяти. Причем системы должны быть автономны, т. е. иметь независимые источники питания.

Как справедливо указано в разд. 1.3, многие из гидрологических процессов в лесу не могут быть определены экспериментально. Особенно это касается составляющих гравитационного стока — поверхностного, внутрипочвенного и др. Одним из путей решения этой проблемы может быть математическое моделирование, которое одновременно является важнейшим этапом обобщения экспериментального материала. В то же время следует учитывать, что сложность гидрологических процессов в лесу, их многофакторная зависимость от природных условий приводит к существенному огрубению расчетных схем и моделей, введению значительного числа ограничений и различных эмпирических коэффициентов. Поэтому приведенные в разд. 1.3 и 1.4 модели процессов в природных системах разного пространственного уровня требуют дальнейшего развития и информационного обеспечения, что должно повысить их обоснованность и расширить сферу применения.

Методические трудности возникают и при решении вопросов оценки влияния различных лесохозяйственных мероприятий. В качестве двух отличных друг от друга подходов приведены системы эмпирических уравнений, основанных на ландшафтно-гидрологическом принципе, и статистический анализ стандартных гидрологических параметров временных рядов естественных и преобразованных процессов. Первый прием, рассмотренный в разд. 1.5, открывает возможность оптимизации и управления гидрологическими процессами в речном бассейне путем проведения различного рода лесохозяйственных мероприятий. В то же время при необходимости оперативной оценки влияния таких значительных воздействий, как лесорубка, более эффективны статистические приемы, предложенные в разд. 1.6.

В целом в главе рассмотрен большой набор методов лесогидрологических исследований, но ни один из них не сможет развиваться без дальнейшей глубокой методической проработки, направленной на создание принципиально новых систем сбора гидрологической информации в лесных геосистемах и унификацию в области ландшафтно-гидрологического описания объектов исследований, на поиск генетически обоснованных приемов перехода от оценки процессов в геосистемах низшего пространственного уровня к анализу и обобщению процессов и объектов более высокой иерархической размерности, включая региональный и планетарный уровни.

## 1.1. ИСТОРИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка гидрологической роли леса включает анализ его водоохранной, водорегулирующей и почвозащитной функций.

Гидрологические свойства леса издавна интересуют гидрологов, лесоводов, климатологов, а в последнее время и экологов. Постоян-

ный интерес к ним установился в XIX в. в связи с падением уровня воды в реках Европы. Для борьбы с этим явлением в отдельных странах в разное время принимались меры и законы, направленные на сохранение лесов с целью сбережения вод и обеспечения благоприятного гидроклиматического режима территорий. В нашей стране большое государственное значение имело постановление ЦИК и СНК СССР от 2 июня 1936 г. о выделении водоохранной зоны вдоль рек на европейской территории страны. В последнее время положения о комплексном использовании и охране вод и лесов закреплены законами «Основы водного законодательства СССР и союзных республик» и «Основы лесного законодательства СССР и союзных республик».

В России и раньше уделялось большое внимание водорегулирующей роли леса. По материалам первых гидрологических наблюдений на р. Волге у г. Астрахани А. И. Войков в 1894 г. пришел к выводу о том, что в результате массовых вырубок лесов и распашек земель в бассейне усилилась неравномерность стока. Вопросу о влиянии леса на водный режим территорий были посвящены работы В. В. Докучаева, Е. В. Опокова. Позднее этим вопросом занимались А. Д. Дубах [1951] и Г. Н. Высоцкий [1952].

Актуальность лесогидрологических исследований возросла в последние 30—40 лет в мировом масштабе в связи с острой необходимости более рационального использования пресной воды и предотвращения последствий антропогенного влияния на водный режим и плодородие земель. Представление о состоянии исследований по этой проблеме в настоящее время можно получить из обзорных работ В. В. Рахманова [1981] и С. Ф. Федорова, С. В. Маруница [1985].

С изучением гидрологической роли леса тесно связаны исследования в области почвенной гидрологии [Роде, 1965; Воронков, 1973; и др.], а также работы по почвозащитной и средообразующей роли леса [Протопопов, 1975; Побединский, 1979; и др.]. В целом этим вопросам посвящено значительное количество работ. Во всех исследованиях авторами подчеркивается важное водорегулирующее и почвозащитное значение лесов.

Леса, обеспечивая перевод поверхностных вод в подземные, способствуют резкому уменьшению или полной ликвидации опасности возникновения эрозии почв. Влияние леса проявляется в ослаблении внутригодовых колебаний стока. Очень существенна в этом отношении водорегулирующая и почвозащитная роль горных лесов.

Важные водорегулирующие, почвозащитные и санитарно-гигиенические функции выполняют защитные леса и лесные полосы, расположенные по берегам рек, озер, водохранилищ. Их значимость особенно возрастает в связи с освоением пойменных земель, широким применением в сельском хозяйстве удобрений и гербицидов.

Под влиянием различных лесохозяйственных мероприятий, и в первую очередь сплошных рубок, все перечисленные выше функции леса резко изменяются. Эти изменения затрагивают часто значительные территории и иногда приводят к таким отрицательным последствиям, как формирование селей и снежных лавин, эрозии почв, заболачивание, снижение продуктивности древостоев и др.

О водоохранной роли леса у специалистов существуют разные представления: одни утверждают, что лес способствует увеличению стока, другие отстаивают противоположное мнение. О дискуссионном характере проблемы можно судить и по докладам, представленным на международных симпозиумах, посвященных влиянию леса на внешнюю среду (Москва, 1970 г.), а также влиянию человека на гидрологический режим (Хельсинки, 1980 г.). Опыт изучения гидрологической роли леса как в нашей стране, так и за рубежом позволяет сформулировать основные причины ошибочных положений, которые приводили и приводят к дискуссиям и неправильным выводам. К ним можно отнести:

— недостаточно объективный выбор предметов исследований (прежде всего парных бассейнов, имеющих разную лесистость), отсутствие детального их описания в отношении всех природных характеристик;

— недоучет иерархичности построения лесных геосистем и отсутствие методов перехода от анализа процессов в низших пространственных уровнях объектов к процессам в объектах более высокой размерности;

— недоучет влияния леса на осадки;

— низкая точность определения испарения с лесных и полевых участков, недооценка роли краевого эффекта (эффекта адвекции);

— отсутствие унифицированного и полного описания лесных насаждений, прежде всего их таксационных и биометрических характеристик, и недоучет их влияния на элементы водного баланса;

— необоснованное использование данных, показывающих влияние вырубки на изменение стока, при оценке водоохранной роли леса;

— неправильная интерпретация результатов наблюдений за стоком с малых водосборов;

— решение поставленного вопроса на основе данных кратковременных наблюдений за элементами водного баланса, неравномерность распределения данных измерений в течение отдельных гидрологических фаз, неполный охват гидрологических процессов в лесу.

При изучении гидроклиматической роли леса выбор методов исследования приобретает особенное значение. Для оценки гидрологической роли леса до последнего времени широко использовался метод сравнения. Он основан на подборе пары водосборов, различающихся только по степени их залесенности при прочих равных условиях. Однако его применение не всегда возможно из-за трудности подбора близких физико-географических условий формирования процессов. Серьезные критические замечания по этому вопросу высказывались ранее [Львович 1963; Шпак, 1968; Соколов, 1982; и др.].

Разновидностью метода парных бассейнов является гидрологическое районирование территории. Оно применяется многими исследователями [Бабкин, 1970; Идзон, Пименова, 1975; и др.]. Но и в этом случае не всегда удается обеспечить правильный подбор парных водосборов, так как в качестве критерия выбора объектов зачастую принимается их меньшая природная неоднородность.

Несостоятельными оказались результаты изучения гидрологиче-

ской роли леса на базе простых сравнительных наблюдений за стоком с малых лесных и полевых водосборов, без учета всего комплекса факторов, влияющих на гидрологический режим.

Анализ данных воднобалансовых станций в СССР показывает, что сток с малых лесных водосборов значительно ниже, чем с безлесных. Аналогичный вывод получен по результатам наблюдений на малых экспериментальных водосборах в США, Швейцарии, ФРГ, Чехословакии, ГДР. На этом основании некоторые исследователи делали неправильный вывод об отрицательном влиянии леса на сток, распространяя его и на большие водосборы, что явилось причиной дальнейшей дискуссии о роли леса. На самом же деле известно, что малые водосборы являются чаще всего незамкнутыми. При небольшой глубине эрозионного вреза значительная часть подземного стока уходит за пределы водосбора, минуя гидрометрический створ. Между тем малые водосборы можно использовать для изучения влияния леса на сток и процесс водорегулирования. Корректное решение этого вопроса может быть достигнуто на основе уравнения водного баланса.

Для исследования влияния леса на сток в последнее время активно применяются корреляционный [Бабкин, 1970; Михович, 1973; Рахманов, 1975; Garczynski, 1980] и системный анализы с привлечением материалов лесоустройства [Антипов, Черкашин, 1986], все больше используется ландшафтно-гидрологический принцип [Антипов, Корытный, 1981; Субботин, 1983; и др.]. Основные его положения были сформулированы В. Г. Глушковым [1961]. В отличие от других методов он базируется на выявлении причинных связей водных ресурсов с характеристиками ландшафтов. Этот принцип может быть применен к объектам разного пространственного уровня, включая малые и большие водосборы.

**Методы экспериментальных исследований.** При изучении гидрологической роли леса кроме метода сравнения в последнее время широко применяется метод водного баланса. В его основе лежат длительные экспериментальные исследования составляющих баланса и их соотношений для лесного и полевого водосборов:

$$K_P = \frac{P_{\text{лес}}}{P_{\text{поле}}}; \quad K_E = \frac{E_{\text{лес}}}{E_{\text{поле}}}; \quad K_Y = \frac{Y_{\text{лес}}}{Y_{\text{поле}}}$$

( $P$ ,  $E$ ,  $Y$ —осадки, суммарное испарение и сток соответственно). Эти соотношения характеризуют влияние леса на осадки, испарение, сток и являются показателями водоохранной и водорегулирующей роли леса. Они не остаются постоянными для всего цикла развития лесных насаждений, но достаточно стабильны для приспевающего, спелого и перестойного древостоев. Для этих стадий развития лесного фитоценоза характерно относительно слабое изменение водного режима под влиянием возраста древостоя.

Из уравнения водного баланса любого природного комплекса следует

$$K_Y = f(K_P, K_E). \quad (1.1)$$

Значит, влияние леса на сток ( $K_Y$ ) может быть выяснено из анализа

данных по влиянию леса на осадки и испарение и количественной оценки соотношений осадков ( $K_p$ ) и испарения ( $K_E$ ) для лесного и безлесного или малозалесенного водосборов.

Еще А. И. Войков [1948] на примере лесостепной зоны европейской территории страны указывал, что даже небольшие лесные массивы способствуют увеличению осадков на 12—27 %; и объяснял это воздействием шероховатости. Дальнейшие исследования подтвердили этот вывод.

Современная концепция взаимодействия леса и влагонесущего потока впервые была разработана О. А. Дроздовым [1950]. В соответствии с ней опушка леса, как препятствие, способствует поднятию линий тока воздуха с определенной степенью увлажнения на более высокие уровни, на которых его влажность может оказаться достаточной для насыщения. Однако этот эффект всегда определяет выпадение осадков. Более значительный подъем линий тока обусловливается тем, что на границе поле — лес происходит резкое торможение воздушного потока и усиление его турбулентности вследствие увеличивающегося трения о новую подстилающую поверхность — лес, динамическая шероховатость которой в 10—20 раз превышает шероховатость поля. Явление турбулизации атмосферы в прикрупном слое отчетливо видно на физической модели, приводящейся в работе А. С. Дубова и др. [1978].

Теоретические положения о влиянии леса на выпадение атмосферных осадков согласуются с результатами многочисленных экспериментальных исследований. К ним относится работа Г. П. Калинина [1950], согласно которой увеличение осадков за май—октябрь на территории Московской области составляет 9 %. Автором леса рассматривались как препятствия в виде небольших возвышенностей. За характеристику шероховатости принималась длина лесных опушек в радиусе 30 км от метеорологической станции. В холодное время связь между лесистостью и увеличением осадков оказалась более слабой.

Аналогичные исследования проводились В. В. Рахмановым [1962]. За параметр шероховатости принималась длина опушек в радиусе 10 км от метеорологической станции. Автором использовались статистические связи между суммами осадков и лесистостью. Было показано, что увеличение осадков, вызванное влиянием леса, на большей части европейской территории СССР составляет 40—60 мм, или около 10—12 % годовой суммы осадков.

Л. П. Кузнецова [1957] анализировала данные об осадках на равнинной территории ЕТС и в Кулундинской степи в Западной Сибири. Влияние лесистости на годовую сумму осадков оценивалось в радиусе 30 км от метеорологической станции. По ее данным, в отдельных районах при увеличении лесистости от 18 до 100 % количество осадков возрастает до 60 мм в год.

Подобные исследования были выполнены А. В. Лебедевым [1964] в бассейнах рек Оби, Иртыша и Енисея. Установлено, что в среднем при возрастании лесистости на каждые 10 % увеличение годовой суммы осадков составляет 12—13 мм. Еще более сильное воздействие леса на формирование осадков было выявлено Р. В. Опритовой [1978] для Приморского края.

По данным А. И. Миховича [1973], в Житомирской области увеличение жидких осадков над лесными массивами составляет около 10 %. Аналогичные результаты получены В. В. Осиповым [1967] для Ярославской области. Специальные экспериментальные работы проводились в Новгородской области. Оказалось, что независимо от состава насаждений (еловые, сосновые, лиственые, смешанные) имеет место положительное влияние леса на осадки: увеличение жидких осадков составляет 10—14 % [Федоров, 1977]. Это объясняется тем, что основной фактор, определяющий влияние леса на осадки, — динамическая шероховатость — для разного состава насаждений в среднем одного порядка. Такие же данные приведены в ряде работ [Раунер, 1965; Константинов, 1968; Марунич, 1973]. В зимний период влияние леса на осадки незначительное.

Увеличение осадков под влиянием леса подтверждено результатами наших наблюдений на двух смежных осадкомерных полигонах площадью по 100 км<sup>2</sup>. На одном из них лесистость составляла 17 %, на другом — 87 %. На каждом полигоне равномерно было установлено по 100 стандартных осадкомеров. По данным наблюдений за июнь—сентябрь 1965 г., число дождей на этих полигонах составило соответственно 88 и 99, т. е. за теплый сезон над лесным полигоном количество дождей было на 12 % больше, чем над полевым. Разница в сумме осадков за этот период составила 8 %.

Выводы о положительном влиянии леса на осадки сделаны на основе данных многолетних наблюдений на сети малых парных лесных и полевых водосборов и осадкомерных пунктов, расположенных в различных районах европейской территории СССР (табл. 1.1). Большая часть рассматриваемых водосборов находится в лесной зоне. Исключение составляет бассейн р. Ток, расположенный в степной зоне в Бузулукском бору, где на метеостанции Боровое наблюдения за осадками ведутся на лесной поляне (с 1928 г.). Для анализа взяты данные наблюдений за жидкими осадками, опубликованные в «Материалах гидрометеорологических наблюдений на полевых и лесных парных водосборах» (за 1969—1983 гг.) и «Справочнике по климату СССР» [1969, вып. 12]. При этом были использованы данные только тех осадкомерных пунктов, которые находятся на удалении не более 6 км друг от друга. Поправка на ветровой недоучет осадков введена только к показаниям осадкомеров, установленных в открытых условиях. Для теплого сезона она рассчитана по экспериментальным данным и в среднем равна 5 %. Из табл. 1.1 следует, что положительная разница сумм осадков над лесом и безлесной территорией за теплый сезон для отдельных районов ЕТС колеблется в пределах 7—18 %. Увеличение количества жидкого осадков над лесом обусловлено внутримассовыми осадками, а не фронтальными. Кроме этого, лесная растительность способствует также накоплению конденсационных осадков. Конденсация имеет особенно большое значение в предгорных и горных районах и является важным дополнительным источником увлажнения. Так, к примеру, на южных склонах гор Рила (Болгария) она составляет в среднем 2,1 %, а в отдельные годы достигает 11,5 % общего количества осадков [Серафимов, 1974].

Таблица 1.1

Зависимость среднемноголетней суммы осадков (за май—октябрь) от вида подстилающей поверхности

Река, в бассейне которой расположены парные водосборы	Период наблюдений, годы	Водосбор	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Вид поверхности	Лесистость, %	Осадки, мм *	Разница в сумме осадков, %
Вологда (Вологодская обл.)	1974—1983	Р. Ершовка	5,84	Еловый лес	94	437/437	
	1974—1983	Р. Лопач	3,60	Пашня	10	370/389	11
Ветлуга (Горьковская обл.)	1969—1983	Р. Красинцы	3,25	Сосновый лес	86	383/383	
	1969—1983	Р. Мокруша	4,52	Пашня	2	337/357	8
Клязьма (Ивановская обл.)	1973—1983	Р. Саворня	3,73	Смешанный лес	82	398/398	
	1973—1983	Р. Лух	2,73	Пашня, луг	14	353/371	7
Вятка (Кировская обл.)	1971—1983	Руч. Межник	2,48	Хвойный лес (ель, сосна, пихта)	79	466/466	
	1971—1983	Руч. Ключи	1,99	Пашня	10	401/422	10
Ток (Оренбургская обл.)	1971—1983	Р. Ток, п. Боровое	27,0	Сосновый лес	100	294/332	
	1971—1983	Р. Ток, ст. Бузулук	—	Постройки	0	252/290	13
	1971—1983	Р. Ток, агрометеостанция Бузулук	—	Пашня	0	238/272	18

\* В числителе — с поправкой на смачивание; в знаменателе — с поправкой на смачивание и ветровой недоучет.

Таким образом, влияние леса на выпадение осадков в равнинных условиях страны проявляется повсеместно и в среднем за многолетний период имеет постоянный характер. По оценкам многих авторов, увеличение осадков составляет около 10 % годовой суммы. Исходя из этого функцию (1.1) можно упростить:  $K_y = \varphi(K_E)$ . Следовательно, изучение водоохранной и водорегулирующей роли леса тесно связано с оценкой показателей суммарного испарения и их соотношений для лесного и полевого водосборов с учетом устойчивого влияния леса на осадки.

Влияние леса на суммарное испарение определяется многими факторами: климатическими, почвенными, гидрогеологическими, таксационными, а также размерами лесного массива и др. Параметром, характеризующим роль климатических факторов, является ра-

диационный индекс сухости М. И. Будыко [1948]

$$I = \frac{\sum R}{L \sum P},$$

где  $R$  — радиационный баланс;  $L$  — удельная теплота парообразования;  $P$  — осадки. Применительно к территории с относительно однородными почвенно-гидрогеологическими условиями соотношение значений испарения с леса и поля может быть представлено в упрощенном виде:  $K_E = \Psi(I, T, S)$ . Здесь  $I$  является зональным фактором

Таблица 1.2

Суммарное испарение  $E$  за май—сентябрь с лесного и полевого водосборов при различных значениях радиационного индекса сухости  $I$ 

Год	$I$	$E$ , мм		$E_{лес}$ $E_{поля}$	Год	$I$	$E$ , мм		$E_{лес}$ $E_{поля}$
		Лес	Поле				Лес	Поле	
1956	1,2	447	427	1,05	1968	1,4	407	404	1,01
1957	1,2	448	421	1,06	1969	1,4	393	394	1,00
1958	1,2	422	384	1,10	1970	1,9	367	401	0,92
1959	1,8	364	401	0,90	1971	1,4	375	326	1,15
1960	1,6	401	414	0,97	1972	3,0	375	—	—
1961	1,2	420	401	1,04	1973	1,4	390	378	1,03
1962	1,1	425	390	1,09	1974	1,0	435	379	1,15
1963	2,1	405	430	0,94	1975	1,6	416	411	1,01
1964	3,0	388	403	0,96	1976	1,1	385	346	1,11
1965	1,6	406	379	1,07	1977	1,1	431	410	1,05
1966	1,4	452	408	1,11	1978	1,4	321	337	0,95
1967	1,4	410	380	1,08	1979	1,6	418	470	0,89

и плавно изменяется по территории; два других фактора (таксационные характеристики  $T$  и площадь лесного массива  $S$ ) азональны. Для подобных соотношений в некоторых случаях могут иметь значение и другие факторы, как, например, вид полевых культурных растений. Однако при значительных площадях водосборов роль таких частных факторов стяживается.

Из работы С. Ф. Федорова [1977] следует, что в одном и том же физико-географическом районе южной тайги ЕТС в различные по увлажненности годы соотношение расходов влаги на испарение с леса и поля существенно зависит от радиационного индекса сухости и может быть как больше, так и меньше 1 (табл. 1.2). Для районов северо-запада ЕТС при значении  $I$ , равном 1,4—1,5, расход влаги на испарение с елового и смешанного леса и поля почти одинаков. При меньших величинах  $I$  это соотношение больше 1, а при больших — меньше 1. В этой зоне повторяемость влажных теплых сезонов в многолетнем ряду существенно выше повторяемости более засушливых сезонов, поэтому показатели испарения за май — сентябрь с еловых и смешанных лесов в отдельные годы в большинстве случаев выше, чем с безлесных территорий. В южных районах лесной зоны сезонные показатели испарения с больших лесных массивов чаще всего ниже, чем с безлесных территорий.

На неоднозначность соотношения значений суммарного испарения с леса и поля обращали внимание и другие исследователи, например А. А. Молчанов [1960].

К основным таксационным характеристикам, оказывающим влияние на суммарное испарение, относятся состав насаждений и возраст. Так, по данным Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ГГИ) за многолетний период (1955—1980) годовые суммы испарения с елового леса (I класса бонитета, IV класса возраста) и поля в условиях Новгородской области составляют соответственно 497 и 474 мм и различаются менее чем на 5 %. По отношению к годовой сумме осадков эта разница составляет 3 %.

Лиственные насаждения (с преобладанием бересы) за теплый сезон испаряют столько же, сколько и еловые. Однако в первую половину вегетации они расходуют влаги на испарение несколько больше, а во вторую — несколько меньше, чем еловые древостои. Показатели суммарного испарения с елового и смешанного леса различаются несущественно — в пределах 5 %.

В еловых и березовых типах леса расход влаги на суммарное испарение заметно выше, чем в сосновых [Молчанов, 1960]. Так, по данным Валдайского филиала ГГИ суммарное испарение с водосбора, занятого преимущественно сосновым лесом, на 8—11 % меньше, чем с водосборов, покрытых еловым и смешанным лесом [Федоров, 1977].

Расход влаги на суммарное испарение как с лесных, так и безлесных территорий происходит в основном в период интенсивной вегетации и в мае—сентябре составляет, например, в южной части таежной зоны соответственно 81 и 82 % годовой суммы. По экспериментальным данным [Молчанов, 1960; Федоров, Марунич, 1979], максимальное испарение с леса наблюдается в возрасте 35—45 лет. Между тем в условиях полевого водосбора испарение из года в год остается стабильным, определяется в основном климатическими факторами и частично видовым составом культурных растений. Отсюда следует, что соотношения показателей испарения с леса и поля постоянно изменяются в зависимости от возраста насаждения.

Влияние размера лесного массива на испарение осуществляется через краевой эффект. Роль этого фактора в лесной зоне практически не проявляется или мало заметна. Она возрастает при переходе от лесной зоны к лесостепной и степной, для которых характерны лесные участки небольших размеров. Так, по Ю. Л. Раунеру [1965], при площади лесного массива 10, 100, 1000 км<sup>2</sup> увеличение суммарного испарения с леса составляет соответственно 16, 7 и 3 %. Следовательно, в этих зонах испарение с небольших лесных массивов может быть больше, чем с безлесных территорий. Однако меньший расход влаги на испарение сосновыми лесами по сравнению с лиственными насаждениями и безлесными участками является характерным и для этих районов.

Таксационные характеристики древостоя и размеры лесного массива во многом определяют соотношения значений испарения с леса и поля, особенно на малых водосборах. Для больших водосборов преобладающую роль играют климатические факторы.

В целом влияние климатических факторов, таксационных характеристик древостоя и размера лесного массива на соотношения значений суммарного испарения с лесных и безлесных территорий различно не только для отдельных физико-географических зон, но и в условиях одной зоны. Это означает, что испарение с лесного водосбора может быть как больше, так и меньше, чем испарение с полевого водосбора, или отличаться незначительно. Суммарное испарение с малых лесных массивов, имеющих большее распространение в лесостепной и степной зонах, нередко может превышать испарение с безлесных территорий. Об этом свидетельствуют результаты исследова-

ния ряда авторов, например А. С. Скородумова [1958]. Превышение показателей испарения в отдельных случаях может оказаться больше положительной разницы в осадках над лесом и окружающим полем, и тогда сток с залесенных водосборов может быть меньше, чем с безлесных. Этот факт подтверждается результатами исследования А. И. Миховича [1973] на территории Украины.

В лесной зоне влияние краевого эффекта на соотношение показателей суммарного испарения с леса и поля выражено слабо, а значение возраста насаждения проявляется лишь на малых водосборах. В итоге для этой зоны соотношение суммарного испарения и стока с лесного и полевого водосборов определяется в основном климатическими факторами. Поэтому здесь чаще всего имеет место однозначное увеличение среднемноголетнего годового стока при росте лесистости водосбора, что следует из материалов наблюдений на равнинной территории.

Особенно значительные исследования в этом направлении проведены В. В. Рахмановым [1962, 1975], который, используя метод сопоставления годового стока рек с разной лесистостью водосборов, пришел к выводу, что увеличение стока под влиянием леса происходит по линейному закону и обусловлено главным образом повышением количества осадков над лесом. Связь годового стока с лесистостью, например, для 12 рек в бассейне р. Вятки (в Кировской области) характеризуется коэффициентом корреляции 0,88. Аналогичные результаты были получены для водосборов, расположенных в бассейне верхнего Днепра, в Среднем Поволжье и на Украине. Согласно С. Х. Будыко [1956], в условиях Белоруссии увеличению лесистости водосборов на каждый процент соответствует приращение годового стока в 1,4 мм, т. е. примерно такое же, как и в бассейнах верхнего Днепра и Вятки. Причем повышенный сток наблюдается в весенний период и летнюю межень. Этот же метод применяли Д. Л. Соколовский [1952], А. П. Бочков [1954] и др.

В отличие от ряда исследователей А. В. Лебедев [1977] при изучении влияния леса на сток рассматривал водный и тепловой балансы природных комплексов речных бассейнов в равнинных лесостепных и степных районах Средней и Западной Сибири. Он показал, что в лесных ландшафтах все элементы водного баланса имеют большие значения по сравнению с лугово-остепненными комплексами. Так, например, при лесистости водосбора 20—40 % разница в стоке в лесу и степи составляет 60—80 мм. Лесные ландшафты возвышенных частей водосборов формируют на 130—200 мм стока больше лугово-степных. Здесь следует отметить существенное влияние рельефа, опосредованное через растительность.

По исследованиям А. И. Миховича [1973], влияние леса на сток носит сложный характер. На основании анализа экспериментальных и сетевых гидрометеорологических данных и изучения соотношения всех составляющих водного баланса водосборов он пришел к выводу о неоднозначности водоохранной роли леса в отдельных физико-географических зонах. Так, на севере Украины (в Полесье) под влиянием лесистости увеличивается речной сток. При этом лес дает

Таблица 1.3

## Зависимость подземного стока от лесистости водосборов

Река — пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Лесистость, %	Осадки за год, мм	Суммарный сток за год, мм	Доля подземного стока в суммарном, %
Луга — Кенгисепп	12 200	62	751	256	30
Луга — Толмачево	5990	59	740	245	34
Великая — Гуйтово	13 400	40	730	234	26
Ловать — Сельцо	8230	40	742	220	26
Шелонь — Заполье	6820	26	754	214	15

Примечание. Таблица составлена по данным справочника «Водные ресурсы...» [1967].

прирост подземной составляющей стока. В лесостепной зоне с преобладанием дубовых насаждений на суглинистых почвах также имеет место увеличение подземного стока. В степной зоне сплошное облесение ведет к уменьшению подземного стока и в целом — к понижению суммарного речного стока.

С. Ф. Федоровым [1977], изучавшим влияние леса на элементы водного баланса малых водосборов в условиях северо-запада ЕТС, также подчеркивается большое водоохранное и водорегулирующее значение лесов. Им показано, что по мере увеличения лесистости увеличивается среднемноголетний сток за весенне-половодье. Для условий Новгородской области разница в значениях годового стока с лесного и полевого водосборов составляет 10—14 %. Положительное влияние леса на сток обнаруживается и в различные по водности годы. Увеличение летнего меженного стока отмечается для водосборов площадью более 6000 км<sup>2</sup>, что хорошо прослеживается по повышению значений подземного стока по мере роста лесистости водосборов (табл. 1.3).

По данным В. Е. Водогрецкого [1979], в лесной зоне леса повсеместно способствуют увеличению стока. В лесостепной зоне сток с лесных водосборов больше, чем с полевых, при условии, когда грунтовые воды залегают на глубине меньше 10 м. При их залегании на глубине более 10 м имеет место обратное соотношение.

В области изучения многофакторных явлений, к числу которых, несомненно, относится и вопрос о влиянии леса на среднемноголетний годовой сток, большой интерес представляет исследование В. И. Бабкина [1970], рассмотревшего влияние различных физико-географических факторов, в том числе и лесистости, на коэффициент внутригодовой зарегулированности (коэффициент, характеризующий внутригодовое колебание стока). Автор применил метод множественной линейной корреляции. Для анализа были использованы данные около 300 водосборов, расположенных во всех физико-географических зонах ЕТС и сгруппированных в 56 районов. В итоге выяснено, что существенное влияние на коэффициент внутригодовой зарегулированности лес оказывает в 25 районах из 56. При этом следует иметь в виду, что количественная характеристика фактора лесистости

отражает влияние не только леса, но и комплекса других факторов.

На неоднозначный характер влияния леса на сток указывается в работах П. Ф. Идзона. Так, П. Ф. Идзон и Г. С. Пименова [1975] применили метод сравнения с использованием районирования для 300 пар водосборов на европейской территории страны. В результате однобразного (положительного или отрицательного) влияния леса на норму стока не обнаружено. Для европейской части СССР положительное воздействие лесистости на годовой сток рек наблюдалось в 40—48 % случаев, обратный эффект — в 18—22 %. Остальные 34—37 % приходятся на случаи изменения в пределах  $\pm 10\%$  от нормы стока. Модули минимального стока, характеризующие подземное питание, во всех районах ЕТС, за исключением центральной части лесостепной зоны, на лесных водосборах в основном выше, чем на малооблесенных.

Дальнейшим развитием этих исследований явилась работа П. Ф. Идзона и др. [1986]. Для оценки водоохранной функции лесов было составлено 433 пары бассейнов, равномерно распределенных на равнинной части ЕТС. Исследовалась вероятность разных соотношений годового стока и его поверхностной и подземной составляющих в речных бассейнах с разной лесистостью в зависимости от общего увлажнения. В результате были получены достаточно обоснованные выводы о водоохранной и водорегулирующей роли леса. Установлено, что она неоднозначна и существенно зависит от почвенно-геологических и других физико-географических условий. Было подтверждено положительное влияние леса на речной сток и естественные ресурсы подземных вод, определяемое зональными условиями. Обеспеченность числа случаев равенства годового стока рек с разной лесистостью бассейнов в пределах  $\pm 5\%$  (в пределах точности гидрометрических измерений) вместе с положительными превышениями выше 5 % составляет в избыточно влажной зоне 82 %, во влажной 76 и в слабозасушливой 69 %. Увеличение среднегодового годового стока более чем на 10 % в пределах этих зон составляет соответственно 57, 51, 38 %.

Положительное влияние леса на сток установлено для территории Польши [Вас, 1968]. Исследование по оценке влияния леса на сток проведено F. Gargzynski [1980] для большой группы водосборов в штатах Орегон и Калифорния на территории США. На основе корреляционного анализа показано, что годовой сток с малых водосборов при площади менее  $22 \text{ km}^2$  слабо зависит от лесистости, а при площади водосборов более  $65 \text{ km}^2$  отмечается положительная связь между этими величинами; парный и частный коэффициенты корреляции достигают соответственно 0,868 и 0,578. Этот вывод противоречит выводам ряда американских авторов, полагающих, что с лесистостью водосборов связано уменьшение стока [Доклады иностранных ученых..., 1970].

В нашей стране и за рубежом имеется ряд работ, в которых отрицается водоохранная роль леса, хотя и признаются его водорегулирующие свойства. Краткая сводка этих материалов приведена в работе В. В. Рахманова [1981]. Следует заметить, что в большинстве

своем они представляют результаты обобщения данных наблюдений за стоком на малых водосборах или же расположенных в сложных геологических условиях и полугорных областях, а также в прибрежных районах. А в таких условиях, как известно, влияние леса на сток затушевывается другими факторами. В целом же большинством исследователей СССР и других стран подчеркивается важное водоохранное значение лесов. Признано, что по мере роста лесистости водосбора годовой сток увеличивается, хотя нередко для одной и той же физико-географической зоны (особенно лесостепной и степной) отмечается неоднозначное влияние леса на сток. Но в этом случае леса играют огромную гидрологическую роль.

Для точного и однозначного решения вопросов о роли леса в формировании гидрологических процессов необходим учет всего набора природных факторов, а не только его растительного компонента. Причем следует иметь в виду, что воздействие леса может осуществляться косвенно, через другие природные компоненты, например почвы или микроклимат. Большую роль играет и размерность исследуемого объекта, когда каждому пространственному уровню явления соответствует свой набор влияющих факторов. Общеизвестно, что гидрологические процессы в малых речных бассейнах более зависимы от характеристик лесного массива, чем бассейны средних и больших рек. В последнем случае типологические, таксационные или биометрические характеристики могут быть интегрированы в такой показатель, как лесистость или площадь древостоев и их расположение на водосборе. Таким образом, только учет всего набора природных факторов в совокупности, детальная методическая проработка приемов исследования, системный анализ объектов изучения, т. е. ландшафтно-гидрологический подход к проблеме, могут привести к обоснованным и достоверным выводам о гидрологической роли леса.

## 1.2. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАНДШАФТНОГО ПРИНЦИПА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЛЕСА НА ВЕСЕННИЙ СТОК

Изучение различных аспектов влияния леса на гидрологический режим проводилось на территории Истринского гидрологического опорного пункта Всесоюзного научно-исследовательского института лесоводства и мелиорации (ВНИИЛМ), находящегося в 70 км к северо-западу от г. Москвы в междуречье Мал. Истры (приток Москвы-реки) и Ламы (приток р. Волги). Этот участок площадью около 200 га является частью Нижнеистринского ландшафта, поверхность которого представлена пологохолмистыми вторичными моренными равнинами, перекрытыми покровными суглинками с господством дерново-подзолистых в различной степени оподзоленных и оглеенных почв. Ельники и смешанные хвойно-широколиственные и вторичные мелколиственные леса занимают немногим более половины площади ландшафта. Остальные земли распаханы.

Первое подробное физико-географическое описание стоковых площадок и бассейнов на Истринском опорном пункте выполнено

В. А. Троицким и М. Н. Жерновой [1939]. Полученные данные были использованы ими в расчетах характеристик стока с лесных и безлесных водосборов. В течение 1937—1938 гг. проведено изучение основных факторов формирования половодья: осадков (в различных лесонасаждениях) [Лучшев, 1940]; почвенного стока; гидрологических свойств лесной подстилки [Созыкин, 1940] и др. В послевоенные годы экспериментальные исследования водоохранной роли лесов были продолжены [Созыкин и др., 1959; Воронков, Павлушкин, 1973]. Опубликованные результаты лесогидрологических исследований оказались трудно сравнимыми, так как недостаточно тщательно изучались стокообразующие свойства литогенной основы, особенности структуры и динамики фитоценозов [Воронков, 1976], и даже противоречивыми, в частности это касается механизма формирования стока с залесенных водосборов.

Значительный прогресс в разработке методик изучения условий формирования стока на малых речных бассейнах был достигнут в период Международного гидрологического десятилетия (1965—1974). Тогда по инициативе А. И. Субботина сотрудниками лаборатории ландшафтоведения кафедры физической географии СССР географического факультета МГУ были проведены ландшафтное изучение и картографирование природных территориальных комплексов на парных (бассейны рек Вытебеть и Нуугра) и экспериментальных (Подмосковная воднобалансовая станция Истринского опорного пункта ВНИИЛМ) бассейнах [Мамай, 1973; Солнцев и др., 1976; Альбова, Маркус, 1977].

Но поскольку опыт стационарного ландшафтного изучения ПТК речных бассейнов невелик, следует подробно рассмотреть методику таких исследований. Картографической основой для наших ландшафтных исследований послужил специально изготовленный по материалам мензульной съемки детальный топографический план поверхности Истринского опорного пункта. Горизонтали на топоплане проведены через 0,5 м. Выбранное сечение хорошо передает особенности всех микроформ эрозионно-расчлененного рельефа. Крупномасштабная картографическая основа позволила провести ландшафтную съемку экспериментальных водосборов на фациальном уровне, наиболее целесообразном, по нашему мнению, для организации стационарных исследований.

На первом этапе составления ландшафтной карты выявлялось морфологическое строение мезорельефа участка. При дальнейшей дифференциации поверхности выделялись элементы мезоформ с одинаковыми морфометрическими показателями, например, приводораздельные и присетевые склоны одинаковой крутизны, однородные участки на склонах эрозионных форм и др. По предварительной карте природных контуров размечалась сеть маршрутов, направлений комплексных профилей и основных точек описаний. Таким образом, были охарактеризованы все фации и их биогенные модификации, что дало возможность установить закономерности распределения почвенно-растительного покрова по элементам рельефа.

Таблица 1.4

Площадь уроцищ в экспериментальных водосборах Истринского опорного пункта, га

Водосбор	Залесенность, %	Уроцище										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ 1	95	23,0	56,0	6,0	—	—	—	—	—	3,0	—	—
№ 2	90	24,0	—	—	0,1	—	0,5	—	—	—	—	—
№ 3	13	11,0	6,0	7,6	1,0	—	—	—	—	—	1,6	3,8
№ 4	57	2,7	7,4	1,9	—	—	0,6	—	0,2	—	—	—
№ 5	23	28,0	—	—	—	0,1	—	5,4	—	—	—	—

На ландшафтной карте \* территории Истринского опорного пункта проявилось не только большое разнообразие фаций — 75 типов и их биогенных модификаций, но и очень сложное их сочетание, что при однородности стратиграфии и механического состава покровных суглинков связано с особенностями микрорельефа территории. Генетически и динамически взаимосвязанные фации образуют природные территориальные комплексы более высокого таксономического ранга — подурочища и уроцища. На исследуемой территории выявлено 11 типов уроцищ: 3 — междуречные равнины; 2 — западины; 5 — овражно-балочная сеть; 1 — надпойменная терраса (рис. 1.1).

Наблюдения за влиянием леса на сток проводились на пяти экспериментальных водосборах. Картометрический анализ ландшафтной карты показал различия в структуре и соотношении площадей уроцищ, входящих в состав этих ВОДОСБОРОВ (табл. 1.4).

Ландшафтная карта крупного масштаба показывает, что функционально-целостная геосистема, каковой является экспериментальный склоновый водосбор [Антипов, Корытный, 1981], представляет собой сложную, но упорядоченную мозаику фаций вершинных поверхностей, приводораздельных и присетевых склонов с пересекающими их неглубокими лощинообразными понижениями. Площади этих понижений и их взаиморасположение в пространстве, несомненно, влияют на динамику формирования весеннего стока. В лесном водосборе № 1 лощинообразные понижения занимают 22 % площади уроцища междуречных равнин, а в полевом водосборе № 3 на них приходится 5,4 %. По этим микропонижениям шириной 20—25 м и глубиной около 0,5 м значительная часть поверхностного стока поступает к широким плоским пониженным равнинам типа привершинных водосборных понижений. В лесном водосборе № 2 и полулесном водосборе № 4 сеть понижений, впадающих непосредственно в отвершки балок, составляет 17,5 и 2,0 % площади междуречных равнин. Ландшафтный анализ экспериментальных площадок (ЭП) в лесном водосборе № 2 (ЭП-1 — лиственный лес; ЭП-2 — еловолиственный лес) и полевом водосборе № 5 (ЭП-4 — луг) свидетельствует, что они характеризуют близкие по природным свойствам

\* Составлена А. М. Альбовой в 1973 г. по материалам полевых исследований А. М. Альбовой, Т. В. Беляевой, В. С. Давыдчука, Я. А. Маркуса.

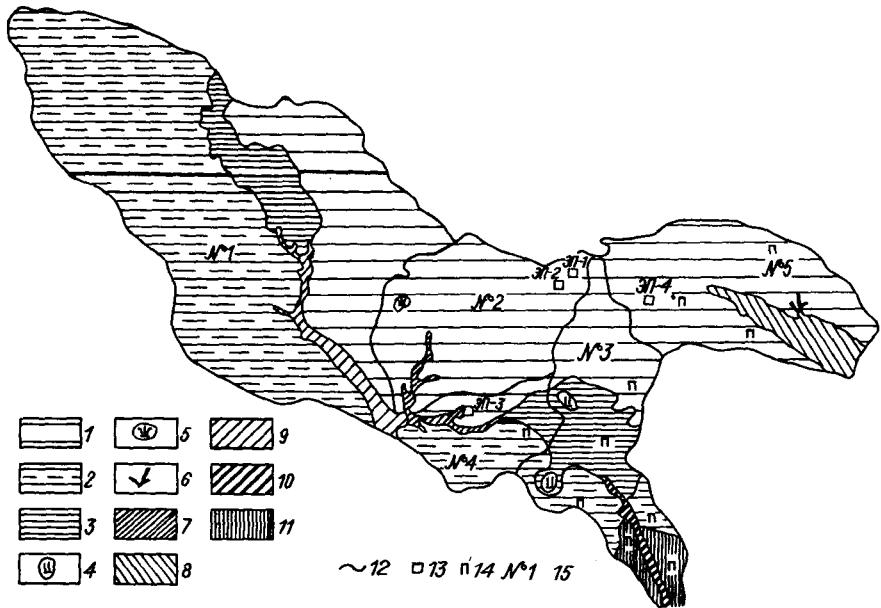


Рис. 1. 1. Ландшафтная карта экспериментальных водосбросов Истринского опорного пункта.

У ро чи ща: 1 — равнины междуречные моренно-водноледниковые, слабовыпуклые, мелковолнистые, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми с глубины около 2—2,5 м мореной, с подзолистыми и дерново-подзолистыми, иногда слабооглеенными почвами под ельниками, смешанными и мелколистовыми лесами и частично пашнями; 2 — равнины междуречные моренно-водноледниковые, выпуклые, ступенчатые, сложенные покровными суглинками, подстилаемыми с глубины около 2—2,5 м мореной, с подзолистыми и дерново-подзолистыми слабооглеенными почвами под смешанными и мелколистовыми лесами, редко под пашнями; 3 — равнины междуречные моренно-водноледниковые, плоские, пониженные, сложенные мощными покровными суглинками и их делювием, с дерново-подзолистыми слабоглееватыми и глееватыми почвами под пашнями и ельниками с примесью осины и ольхи серой; 4 — западины, выполненные делювиальными суглинками, с торфяно-глеевыми и иловато-болотными почвами под болотно-травно-осоковым травостоем и водными растениями; 5 — западины, выполненные делювиальными суглинками, с низинными среднemoщными торфяными почвами под осоковым травостоем со сфагnumом; 6 — овраги в суглинках, задернованные с дерново-слабоподзолистыми эродированными почвами под смешанными лесами (по крутым склонам) и дерновыми слабоглееватыми почвами под дубово-липовыми редколесьями (по днищам); 7 — балки овражистые в суглинках, со слабоподзолистыми слабоглееватыми почвами под ельниками-кистичниками (по крутым склонам) и дерновыми глееватыми почвами под ельниками влажнотравными (по днищам); 8 — балки в суглинках, с дерново-подзолистыми, иногда слабооглеенными почвами под бобово-разнотравно-мелко-злаковыми лугами и пашнями (по склонам) и с дерновыми в различной степени оглеенными почвами под разнотравно-влажнотравно-щучковыми лугами (по днищам); 9 — балки в суглинках с дерново-подзолистыми, иногда оглеенными почвами под ельниками, смешанными лесами и вырубками (по склонам) и дерновыми глееватыми под дубово-еловыми влажнотравными редколесьями (по днищам); 10 — балки неглубокие, лощинобразные, в суглинках, с дерново-подзолистыми, иногда оглеенными почвами под мелко-злаково-разнотравными лугами и пашнями (по склонам) и дерновыми глееватыми и слабоглееватыми почвами под разнотравно-влажнотравно-щучковыми лугами (по днищам); 11 — террасы надпойменные, наклонные, сложенные древнеаллювиальными суглинками, с дерново-слабоподзолистыми почвами под пашнями; 12 — границы экспериментальных водосбросов; 13 — местоположение экспериментальных площадок (ЭП); 14 — пашня; 15 — номера экспериментальных водосбросов.

фации вершинных поверхностей уро чища 1 (см. рис. 1.1). Преобла дающие здесь слабоподзолистые разности дерново-подзолистых почв имеют следующую систему и мощности почвенных горизонтов:

$A_0$  — 2—6 см;  $A_1$  — 6—12 см;  $A_1A_2$  — 5—15 см;  $A_2$  — 5—12 см (часто отсутствует);  $A_2B$  — 10—35 см;  $B$  — более 50 см. Механический состав верхних горизонтов почв легко- и среднесуглинистый. Для иллювиального горизонта характерно увеличение содержания илистой и тонкопылеватой фракций.

Результаты многолетних наблюдений дают представление о различных факторах влагооборота в биогенных модификациях фаций вершинных поверхностей междуречий. Предзимние запасы влаги в почве в значительной степени определяют фильтрационные свойства мерзлой толщи в период формирования весеннего стока. По наблюдениям на экспериментальных площадках за период с 1966 по 1974 г. разница в осенних запасах влаги в метровом слое почвы в лиственном лесу (376 мм) и чистом ельнике (345 мм) составляет около 30 мм. Опираясь на эти данные, Н. А. Воронков [1976] делает вывод, что транспирация в ельниках больше, чем в лиственном лесу, и что древостои с участием лиственных пород обеспечивают несколько большее значение суммарного стока, чем густые темнохвойные леса. Представляется, что снижение влагозапасов в ельнике (ЭП-3) связано с его лучшей дренированностью, обусловленной большими уклонами дневной поверхности и свободным оттоком почвенной влаги в балку (см. рис. 1.1), в отвершках которой заложена экспериментальная площадка.

Осенью показатели влагонасыщенности почв довольно высоки — 345—376 мм — и незначительно варьируют в насаждениях разного состава сходных местообитаний. Высокое содержание влаги в верхней метровой части почвенного профиля объясняется большой влагоемкостью, хорошим проникновением обильных осенних осадков в корнеобитаемый слой и затрудненной фильтрацией влаги в заиленный иллювиальный горизонт. Большее насыщение влагой наблюдается в лощинообразных понижениях. В них влага поступает с осадками вследствие бокового почвенного и поверхностного стоков. О росте увлажнения косвенно свидетельствует осенний сток, фиксируемый в замыкающем створе лесного водосбора № 2 в отдельные годы за период с 1965 по 1982 г.

На Клинско-Можайской вторичной мореной равнине среди господствующих хвойно-широколиственных лесов часто встречаются массивы чистых ельников [Солнцев, 1961], а на антропогенно нарушенных участках — елово-лиственные и лиственные (осиново-березовые) леса. В комплексе лесогидрологических исследований на Истринском опорном пункте со временем его основания проводятся наблюдения за характером проникновения осадков под полог лесов разного породного состава. Для открытых участков стационара за период с 1962 по 1974 г. норма осадков составила 626 мм, что приблизительно на 20 мм меньше, чем на открытой метеоплощадке ст. Ново-Иерусалимской, удаленной на 12 км. Лишь 20 % среднегодового количества осадков выпадает зимой. Проникновение твердых осадков под лесной полог тесно связано с породным составом и сомкнутостью крон древостоев (табл. 1.5). Так, по данным за 15-летний период наблюдений, под пологом чистого ельника максималь-

Таблица 1.5

Среднемноголетние (1966—1980) максимальные снегозапасы в различных фациях

Фация	Местоположение	Состав древостоя	Сомкнутость древостоя зимой	Мощность снежного покрова, см	Запас воды в снеге, мм
Лиственный лес	Вершинная поверхность	6Б40с ед. ДЛп 5Е40с1Б	0,1	60	127
Елово-лиственный насаждение со II ярусом ели	То же		0,4	48	98
Ельник чистый	»	10Е	0,8	40	89
Приопушечный луг	Пологий склон	—	—	46	110

ные запасы воды в снеге к началу снеготаяния составляют в среднем 77 % от снегозапасов на лесной поляне и 70 % от снегозапасов в лиственных насаждениях.

Интерполяцию многолетних экспериментальных данных по снегонакоплению в лесонасаждениях разного породного состава можно провести на основе сведений о растительном покрове (составе древесного полога, подроста и подлеска, сомкнутости крон древостоя), содержащихся на детальной ландшафтной карте.

Зимой в верхней части профиля повышенно увлажненных почв на вершинах и склонах междуречий почти ежегодно формируется сезонно-мерзлый слой. Его мощность, по многолетним наблюдениям, составляет под осиново-березовым лесом 25,5 см, под мелколиственными-еловым лесом 43,9 см, под ельниками 59,1 см [Воронков, 1976]. Этот показатель при приблизительно одинаковой влажности почв и глубине залегания грунтовых вод тесно коррелирует с высотой снежного покрова в этих насаждениях, хотя прямо пропорциональной зависимости нет. Так, в многоснежную зиму 1969/70 г. в лиственном лесу при высоте снега около 80 см почва промерзла на 10 см, в то время как в ельнике при высоте снега около 50 см — на 45 см, а в малоснежную зиму 1970/71 г. при 45-сантиметровом слое снега почва в лиственном лесу промерзла на 25 см, а в ельнике, где снега было вдвое меньше, почти на 70 см.

Наблюдения за динамикой сезонно-мерзлого слоя показали, что в многоснежные зимы нижняя граница промерзания почвы длительное время остается стабильной. Оттаивание почвы происходит постепенно. В малоснежные зимы вскоре после максимального промерзания начинается оттаивание снизу. Специальных наблюдений за промерзанием в фациях микролощин, почвы которых сезонно переувлажнены, не проводилось. В этих повышенно увлажненных местообитаниях в древесном пологе отмечается значительное участие мелколиственных пород (осины, березы, ольхи), а наземный покров состоит из крупных дерновинных злаков, влажно- и крупнотравья, образующих мощный дерновый горизонт. При значительной мощности снежного покрова, повышенной увлажненности почв и мощной дернине промерзание в микролощинах бывает незначительным или сезонно-мерзлый слой не формируется совсем.

Таким образом, в разных лесонасаждениях ландшафтов вторичных моренных равнин формирование максимального стока половодья зависит от сложившихся в осенне-зимне-весенний период гидротермических условий. Снеготаяние в хвойно-мелколиственных насаждениях и ельниках начинается и оканчивается приблизительно в одни и те же сроки, с возможными отклонениями на 5 дней в ту или другую сторону. В среднем за 15 лет (с 1965 по 1980 г.) продолжительность периода со снежным покровом в этих лесах была практически одинакова — 153 и 152 дня.

Интенсивность снеготаяния в лесу тесно связана с погодными условиями и микроклиматом насаждений. Кроны деревьев еловых лесов, широко распространенных на вторичных моренных равнинах, почти полностью задерживают коротковолновую радиацию. От суммарной солнечной радиации под полог ельников проникает только 5 % [Субботин и др., 1971]. Дополнительным препятствием поступления радиации на поверхность снега служит опад (хвоя, мелкие ветви, продукты выветривания коры). По нашим наблюдениям, опад в ельниках составил за зимний период 103—143 г/м<sup>2</sup>, в елово-мелколиственном лесу — 30—36, в мелколиственном — 10—12 г/м<sup>2</sup>. Снеготаяние и водоотдача из верхних слоев снега начинаются с установлением положительных температур. Средняя интенсивность снеготаяния в ельниках 4,1 мм/сут, в елово-мелколиственном лесу — 4,5, в мелколиственном — 5,1 мм/сут. Поступление воды на поверхность почвы происходит в первую очередь на полянах и в лиственных насаждениях, особенно на склонах южной экспозиции. При сравнительно небольшой интенсивности водоотдачи почва, не имеющая сезонно-мерзлого слоя, быстро поглощает талые воды. Этому способствуют большая порозность верхней части ризосферы и дефицит влажности почв.

Просачивание воды в талые и мерзлые дерново-подзолистые почвы на примере близкого по природным свойствам ландшафта Кунцевской водноледниково-мореной равнины детально изучено А. И. Субботиным [1966], проводившим эксперименты на Подмосковной воднобалансовой станции. Опираясь на подробную ландшафтную карту, рассмотрим сток гравитационных вод с залесенных водосборов Истринского стационара.

Н. Ф. Созыкиным и др. [1959] было отмечено, что вскоре после начала снеготаяния в лесу поверхностный сток наблюдается прежде всего по низинам и потяжинам, которые, как показали наши исследования, являются различно увлажненными фациями лощинообразных понижений. В этих открытых для прямой солнечной радиации участках талые воды, практически не расходуясь на фильтрацию в повышенно увлажненные дерново-подзолистые глееватые среднесуглинистые почвы, заполняют нанонеровности днищ.

По многолетним наблюдениям, самый ранний срок начала стока с лесных водосборов Истринского опорного пункта — последние дни марта, а самый поздний — 20.IV. Средняя дата начала половодья за период с 1950 по 1968 г. — 7.IV, а его окончания — 30.IV [Субботин и др., 1971]. Формирование ручейков в лощинообразных пониже-

Таблица 1.6  
Показатели весеннего стока с лесных бассейнов Истринского опорного пункта

Год	Бассейн № 2 (лесистость 90 %)			Бассейн № 4 (лесистость 57 %)		
	Коэффициент	Слой, мм	Максимальный модуль, л/(с · га)	Коэффициент	Слой, мм	Максимальный модуль, л/(с · га)
1962	0,15	23	0,72	0,34	57	2,73
1963	0,39	41	1,36	0,68	80	4,95
1964	0,10	11	0,51	0,30	32	1,70
1965	0,05	7	0,55	0,16	23	2,06
1966	0,48	109	1,88	0,64	141	2,45
1967	0,32	48	1,19	0,51	72	2,76
1968	0,11	20	0,57	0,30	61	7,52
1969	0,12	15	0,55	0,30	42	2,42
1970	0,45	98	1,52	0,50	118	4,33
1971	0,09	11	0,26	0,23	31	1,42
1972	0,26	28	0,95	0,41	46	2,19
1973	0,07	9	0,55	0,18	23	1,42
1974	0,07	10	0,12	0,15	19	1,47
1975	0,15	14	0,85	0,23	22	1,70
1976	0,16	38	3,39	0,20	49	3,60
1977	0,23	40	0,55	0,30	60	3,50
1978	0,19	30	1,40	0,19	28	0,50
1979	0,24	40	0,42	0,37	42	0,97
Среднее	0,20	32	0,96	0,33	52	2,64

ниях происходит в результате поступления талых вод с пологих склонов межложбинных пространств. В этих местоположениях в процессе образования верховодки начинается почвенный сток, направленный в соответствии с уклоном дневной поверхности к ложбинам. Отток избытка талых вод наблюдается в лесной подстилке и верхних горизонтах почв, характеризующихся сильной порозностью корнеобитаемого слоя. Как было отмечено выше, на микроложбины приходится до 20 % площади уроцищ междуречных равнин. Это способствует быстрому дренированию территории. Воды, поступившие в лощинообразные понижения, не сразу дренируются в овражно-балочную сеть. В начале они аккумулируются в обширных привершинных водосборных понижениях и заболоченных западинах. Воды, поступившие через многочисленные отвершки в балки, имеющие большой продольный уклон, быстро достигают замыкающего створа. На быстрый сброс вод по балкам, прорезающим вторичные моренные равнинны, косвенно указывает слабое поверхностное оглеение дерновых почв по днищам.

В среднем сток талых вод с лесного бассейна № 2 длится 25 дней (с 5 по 30.IV). За это время выпадает около 35 мм осадков, пополняя снегозапасы приблизительно на 30 %. Сравнение характеристик весеннего стока с бассейна № 2 и полулесного бассейна № 4 (табл. 1.6) свидетельствует, что в лесу в среднем за 18-летний период 80 % от суммы снегозапасов и жидких осадков за половодье задержи-

вается на водосборе. Такие же потери отмечены в лесном логу Подмосковной воднобалансовой станции [Субботин, 1966].

Анализ процессов формирования весеннего стока на залесенных вторичных моренных равнинах показывает, что водообразование на водосборе связано с формированием временной верховодки над неглубоко залегающим иллювиальным горизонтом дерново-подзолистых почв. Густая сеть лощинообразных понижений, расчленяющих склоны междуречных равнин, является первичным водоприемником почвенного стока. Скорости оттока почвенных вод в лощинообразные понижения дифференцированы и тесно связаны с морфологическими особенностями почвенных горизонтов.

Изучение условий формирования весеннего стока в одном из ландшафтов вторичных моренных равнин показывает, что процесс перераспределения свободной влаги характеризуется значительным пространственно-временным разнообразием, предопределенным природными свойствами фаций, закономерно сочетающихся в урочищах. Привлечение материалов детальных ландшафтных исследований позволит существенно усовершенствовать представление о развитии гидрологических процессов в разных типах леса.

### 1.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МАЛЫХ ЛЕСНЫХ ВОДОСБОРАХ

В области математического моделирования процессов формирования стока на малых лесных водосборах уже накоплен определенный опыт [Корень, 1980; Чеботарев, 1981, 1982; Трубихин, 1983; Епихов, 1985]. При этом модели гидрологических процессов на водосборе получили высокую практическую оценку.

История лесогидрологических исследований показывает, что они были направлены главным образом на решение двух проблем. Первая — влияние леса или лесистости на сток — решалась в основном путем сравнения хода гидрологических процессов в лесных и безлесных водосборах. Вторая — влияние леса на структуру водного баланса почвы — решалась с помощью анализа результатов длительных наблюдений за динамикой влажности почвы и других элементов. В последнее время большое внимание стали уделять другому аспекту лесогидрологических исследований — влиянию пространственного размещения леса на формирование стока [Огиевский, 1937; Дубах, 1951; Чеботарев, 1982]. Однако решить эту проблему стационарными методами на экспериментальном водосборе практически невозможно.

В результате многолетних наблюдений накоплены большой материал и опыт по выявлению механизма формирования стока на лесных водосборах. Эти исследования явились важным этапом в изучении гидрологических процессов, но они сопряжены с рядом трудностей методического характера. Уравнение водного баланса экспериментального водосбора имеет вид

$$R = c + Q + q + E + T + G + \Delta s, \quad (1.2)$$

где  $R$  — осадки;  $c$  — перехват осадков растительностью;  $Q$  — поверх-

ностный сток;  $q$  — внутрипочвенный сток;  $E$  — испарение;  $T$  — транспирация;  $G$  — отток влаги из почвы;  $\Delta s$  — изменение запасов влаги в почве. Для решения этого уравнения можно измерить в условиях стационара с достаточной точностью только четыре составляющие:  $R$ ,  $c$ ,  $(Q+q)$  и  $\Delta s$ . Причем раздельно определить  $Q$  и  $q$  на всей водосборной площади невозможно. Поскольку не все составляющие уравнения (1.2) поддаются измерению, то, естественно, и нельзя полностью вскрыть суть процесса формирования стока. В доказательство этого утверждения можно сослаться на результаты Общесоюзной дискуссии о механизме формирования внутрипочвенного стока, которые не дают однозначных оценок. Следовательно, одних только экспериментальных гидрологических данных, видимо, недостаточно, особенно, для экстраполяции их на экстремальные по водообеспеченности ситуации.

Сложности стационарных гидрологических исследований в определенной степени могут быть разрешимы с помощью математических моделей гидрологических процессов. Как показывает опыт, такие модели позволяют не только получить значения всех составляющих уравнения водного баланса [Ладейщикова, Чеботарев, 1984], но и применить их для изучения гидрологических характеристик в экстремальных ситуациях [Чеботарев, 1985]. В связи с этим основное внимание уделяется разработке моделей гидрологических процессов на малых водосборах. Во-первых, они дают возможность оценить экстремальный сток с лесных и безлесных малых водосборов, во-вторых, позволяют выявить структуру водного баланса почвы под лесными насаждениями в годы экстремальной водообеспеченности.

В течение летнего сезона рассматривается динамика только тех гидрологических процессов, которые непосредственно формируют дождевой сток, т. е. изучаются осадки, их перехват растительным покровом, испарение с поверхности почвы, транспирация, вертикальный перенос влаги в почве, поверхностный и почвенный сток. Физическая интерпретация процессов формирования стока следующая. Осадки, выпадающие на экспериментальный водосбор, равномерно орошают его площадь и имеют различную интенсивность. Низкая интенсивность дождей, как правило, не приводит к появлению поверхностного стока, хотя может способствовать образованию внутрипочвенного. Ход осадков во времени имеет стохастическую природу. Появление стока на водосборе определяется комплексом детерминированных процессов. Объем поверхностного стока зависит от соотношений интенсивности осадков и скорости впитывания влаги в почву. Водопроницаемость почвы определяется ее влажностью, а интенсивность внутрипочвенного стока обусловлена динамикой гравитационной влаги в почве. Отсюда следует, что почва является ключевым звеном в процессе формирования дождевого стока.

Воздействие климата на процессы влагопереноса в почве осуществляется через случайное чередование процессов пополнения и разгрузки почвенной влаги. В бездождный период градиент почвенной влаги регулирует испарение и транспирацию. В период выпадения осадков верхние слои почвы насыщаются и градиент почвенной

влаги способствует движению воды вниз через сухую почвенную колонку. При высокой влагонасыщенности почвы начинается поверхностный и почвенный сток. Таким образом, почва, трансформируя дождевые осадки, регулирует дождевой сток.

Динамическим (детерминированным) считается такой процесс, поведение которого во времени можно определить точно, зная его начальное состояние, стохастическим — процесс, поведение которого во времени можно предвидеть с некоторой вероятностью. Процессы, участвующие в формировании дождевого стока, имеют как детерминированную, так и стохастическую природу. К детерминированным процессам следует отнести влагоперенос в почве, испарение, транспирацию, перехват осадков растительным покровом, почвенный и поверхностный сток. Стохастическую природу имеют осадки и климатические условия, определяющие испарение и транспирацию.

Для описания детерминированных гидрологических процессов, участвующих в формировании дождевого стока, могут быть использованы модели, апробированные по результатам стационарных исследований [Чеботарев, 1981; Трубихин, 1983; Епихов, 1985]. Ниже приводятся основные уравнения, описывающие динамику гидрологических процессов:

поверхностный склоновый сток:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \left[ \frac{n(X)}{\sqrt{i_s(X)}} \right]^{0.6} \frac{\partial}{\partial t} Q^{0.6} = a(t) - i(t); \quad (1.3)$$

почвенный сток:

$$\frac{\partial q}{\partial X} + \left[ \frac{\mu}{f \cdot i_s(X)^{0.6}} \right] \frac{\partial}{\partial t} q^{0.6} = V(t); \quad (1.4)$$

вертикальный влагоперенос в почве:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\Theta) \right] - S(z, t) - F(z, t); \quad (1.5)$$

транспирация:

$$T(t) = k_1 d(t) \int_0^R \ln \frac{\psi_{B3}}{\psi} dz; \quad (1.6)$$

испарение:

$$E(t) = k_2 d(t) \exp \left[ \frac{\Theta(0, t) - \Theta_s}{\Theta_s} \right]; \quad (1.7)$$

инфилтрация:

$$i(t) = \left[ K(\Theta) - K(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right]_{z=0}; \quad (1.8)$$

приток воды к почвенному верховодке:

$$V(t) = \int_0^L F(z, t) dz; \quad (1.9)$$

$$F(z, t) = \begin{cases} k_3(\Theta - \Theta_{\text{HB}}), & \Theta \geq \Theta_{\text{HB}}, \\ 0, & \Theta < \Theta_{\text{HB}}; \end{cases} \quad (1.10)$$

задержание осадков растительным покровом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0,75a(t) - 4,9 \cdot 10^{-5} \exp(s - c); \quad (1.11)$$

водопроницаемость почвы:

$$K(\Theta) = K_f \left[ \frac{\Theta - \Theta_{\text{HB}}}{\Theta_s - \Theta_{\text{HB}}} \right]^{3,5}; \quad (1.12)$$

потенциал почвенной влаги:

$$\Psi(\Theta) = P \left[ \frac{\Theta - \Theta_{\text{HB}}}{\Theta_s - \Theta_{\text{HB}}} \right]^{-0.25}; \quad (1.13)$$

начальные условия:

$$Q(x, t=0) = 0; q(x, t=0) = 0; \Theta(z, t=0) = \Theta_n(z); \quad (1.14)$$

граничные условия:

$$Q(x=0, t) = 0; q(x=0, t) = 0; \frac{\partial \Theta}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0; \quad (1.15)$$

$$a(t) - E(t) - \frac{dc}{dt} = K(\Theta) \cdot \left( 1 - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)_{z=0}, \quad (1.16)$$

где  $Q(x, t)$  — расход поверхностного стока;  $n(x)$  — шероховатость поверхности по Маннингу;  $i_s(x)$  — уклон поверхности;  $a(t)$  — интенсивность осадков;  $i(t)$  — инфильтрация;  $q(x, t)$  — расход почвенного стока;  $V(t)$  — интенсивность притока гравитационной влаги к почвенной верховодке;  $\mu$  — пористость почвы;  $\Theta(z, t)$  — объемная влажность почвы;  $K(\Theta)$  — водопроницаемость почвы;  $\Psi(\Theta)$  — потенциал почвенной влаги;  $S(z, t)$  — интенсивность поглощения влаги корневой системой растений из единицы объема почвы;  $F(z, t)$  — интенсивность образования гравитационной влаги в единице объема почвы;  $T(t)$  — транспирация;  $d(t)$  — дефицит влажности воздуха;  $R$  — глубина распространения корней;  $\Psi_{\text{вз}}$  — потенциал влажности завядания;  $E(t)$  — испарение с поверхности почвы;  $\Theta_s$  — максимальная влагоемкость почвы;  $L$  — мощность рассматриваемого слоя почвы;  $\Theta_{\text{HB}}$  — наименьшая влагоемкость почвы;  $c(t)$  — слой осадков, задержанных растительностью;  $s$  — максимальный слой осадков, задержанных растительным покровом;  $\Theta_{\text{вз}}$  — влажность завядания;  $K$  — коэффициент фильтрации;  $P$  — давление барботирования;  $\Theta_n(z)$  — начальный профиль влажности почвы;  $x$  — пространственная координата, направленная вдоль поверхности склона;  $z$  — вертикальная координата, направленная вниз;  $t$  — текущее время;  $k_1, k_2, k_3$  — константы. Гидрограф дождевого стока в замыкающем створе водосбора рассматривается как сумма поверхностного и почвенного стока.

Отличительная особенность модели (1.3) — (1.16) — детальное воспроизведение динамики элементов гидрологического цикла. В качестве примеров ее использования проанализированы процессы поверхного и почвенного стока в течение двух летних сезонов с одинаковым количеством выпавших осадков. В первом случае дожди выпадали часто, но с небольшой интенсивностью, во втором — имели место редкие ливневые осадки. Очевидно, что осадки с низкой интенсивностью не способны сформировать поверхностный сток, но при этом может образоваться небольшой почвенный сток в результате насыщения почвы влагой. С другой стороны, высокointенсивные ливневые осадки в состоянии обеспечить высокие расходы поверхностного и почвенного стока. Получается, что за летний сезон при одном и том же количестве осадков формируются различные объемы поверхностного и почвенного стока в зависимости от характера выпадения осадков.

Модель хода осадков как случайного процесса, разработанная нами ранее [Чеботарев, 1983], хорошо описывает распределение суммы осадков за любой период времени. В модели непрерывно воспроизводится два физически разных временных параметра: продолжительность дождя  $t_R$  и длительность бездождного периода  $t_B$ . Случайные величины  $t_R, t_B, a(t)$  предполагаются статистически независимыми. Практическая реализация модели показала, что число дождей, наблюдавшихся за несколько лет, дает весьма точную оценку параметров временного хода осадков. Каждая из случайных величин  $t_R, t_B, a(t)$  описывается показательной функцией распределения:

$$F(t_B) = 1 - \exp(-\lambda_1 t_B); \quad (1.17)$$

$$F(t_R) = 1 - \exp(-\lambda_2 t_R); \quad (1.18)$$

$$F(a) = 1 - \exp(-\lambda_3 a), \quad (1.19)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  — параметры, обратные по значению математическому ожиданию случайных величин. В систему уравнений (1.3) — (1.16) входит еще одна случайная величина, определяющая ход испарения и транспирации: дефицит влажности воздуха, который, как предполагается, имеет нормальное распределение

$$F(d) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \quad (1.20)$$

где  $m$  и  $\sigma$  — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины.

Таким образом, динамика процессов дождевого стока на водосборе воспроизводится системой уравнений (1.3) — (1.16). Их решение требует задания временного хода осадков и дефицита влажности воздуха. Для этого может быть использован метод Монте-Карло, с помощью которого разыгрывается вероятность появления случайных величин  $t_B, t_R, a(t)$  и  $d(t)$ . В интервале 0 — 1 генерируется случайное число, принимаемое за значение функции  $F(t_B)$ . Из уравнения (1.17) находится соответствующее значение аргумента  $t_B$ . За период  $t_B$

величина  $a(t)=0$ . Генерируется второе независимое случайное число, которое является значением функции  $F(t_R)$ . С помощью уравнения (1.18) отыскивается величина  $t_R^1$ . Затем генерируется  $t_R^j$  независимых случайных чисел, представляющих собой значения функции  $F(a)$ . Из уравнения (1.19) определяются величины  $a(t)$ , последовательность которых описывает ход осадков за период  $t_R$ . После этого цикл расчетов повторяется. Генерация случайных независимых чисел продолжается до тех пор, пока не будет выполнено равенство  $N=t_B^1+t_R^1+t_B^2+t_R^2+\dots+t_B^j+t_R^j$ , где  $j$  — целая переменная;  $N$  — период времени, за который рассматривается дождевой сток на водосборе. Тогда генерируется  $N$  независимых случайных чисел, каждое из которых поочередно подставляется в уравнение (1.20) для получения временного хода дефицита влажности воздуха. Имея  $a(t)$  и  $d(t)$ , с помощью уравнений (1.3) — (1.16) можно воспроизвести динамику формирования стока на водосборе, в результате чего рассчитать гидрограф дождевого стока в замыкающем створе водосбора. По гидрографу можно определить любые гидрологические характеристики, например максимальный расход и слой дождевого стока. Обращаясь вновь к методу Монте-Карло, можно разыграть новые последовательности  $a(t)$  и  $d(t)$  и, решив систему уравнений (1.3) — (1.16), в конечном счете получить новые гидрографы дождевого стока. Этот процесс можно повторить многократно и в результате получить длительные ряды гидрологических характеристик.

Разработанная динамико-стохастическая модель гидрологических процессов формирования стока проверена на данных экспериментальных наблюдений на водосборах Подмосковной воднобалансовой станции. В качестве объектов исследований выбраны экспериментальные водосборы Беззубовский (полностью облесен, площадь  $2,69 \text{ км}^2$ ) и Логиновский (безлесный, площадь  $1,43 \text{ км}^2$ ). Подробное описание территории водосборов и методики гидрометеорологических наблюдений изложены в работе «Материалы...» [1975]. По модели получены длительные статистические ряды слоя дождевого стока за летний сезон и максимальные среднесуточные расходы.

Для водосборов Беззубовский и Логиновский методом Монте-Карло через величины  $a(t)$  и  $d(t)$  и решение системы уравнений (1.3) — (1.16) для 1000 летних сезонов получены функции распределения слоя осадков за летний сезон, слоя дождевого стока и максимальных расходов воды (рис. 1.2). Рассчитанная функция распределения дождевого стока позволяет определить характеристики стока практически любой обеспеченности на лесном и безлесном водосборах.

В качестве примера рассмотрены характеристики стока с лесного и безлесного водосборов в годы экстремальной водообеспеченности. Под экстремальными ситуациями понимаются такие события, которые имеют место 1 раз в 100 лет. Их может быть два: первое — засушливый период, которому соответствует вероятность появления, равная 0,01; второе — сильные наводнения с вероятностью появления 0,99. В засушливый период с вероятностью появления 1 раз в 100 лет при слое осадков за летний сезон 80 мм на безлесном водосборе Логиновский дождевой сток отсутствует, а на лесном водосборе Беззубовский

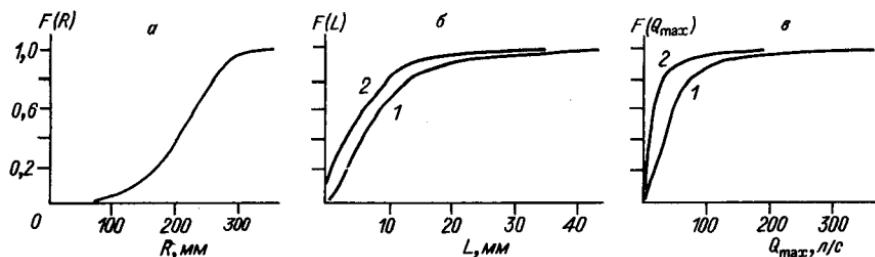


Рис. 1.2. Функции распределения осадков за летний сезон (а), слоя дождевого стока (б) и максимальных расходов воды (в) на Беззубовском (1) и Логиновском (2) водосборах.

слой стока составляет не более 0,5 мм. В период катастрофических наводнений с повторяемостью 1 раз в 100 лет слой осадков за этот период составляет 351 мм. При этом слой стока на безлесном водосборе достигает 42 мм, а на лесном — 35 мм. Максимальные расходы воды на безлесном и лесном водосборах составляют соответственно 325 и 153 л/с. Полученные данные свидетельствуют о положительной роли леса при формировании дождевого стока на водосборе в годы с экстремальной водообеспеченностью.

Система уравнений (1.3) — (1.20) может быть использована не только для оценки стока с лесных водосборов. Ее можно применить и для моделирования структуры водного баланса почвы под лесом и на безлесных участках. Уравнение водного баланса для почвенной колонки конечной глубины в одномерной схематизации имеет вид

$$R - C - Q = E + T + G + \Delta S. \quad (1.21)$$

В этом уравнении приходными составляющими баланса являются  $(R - C - Q)$ , расходными —  $(E + T + G)$ . С помощью системы уравнений (1.5) — (1.20) можно рассчитать все составляющие уравнения (1.21) для конкретного промежутка времени  $t$ :  $(R - C - Q) =$

$$\int_0^t [a(t) - c(t) - Q(t)] dt; \quad (E + T + G) = \int_0^t [E(t) + T(t) + V(t)] dt;$$

$$\Delta S = \int_0^L [\Theta(z, \tau) - \Theta(z)] dz.$$

Аналогично решению системы уравнений (1.3) — (1.20) при получении длинного ряда гидрологических характеристик можно применить подобный алгоритм для расчета длительных рядов элементов водного баланса. Такая задача уже решалась нами [Чеботарев, 1983].

Уравнение водного баланса почвы (1.21) может рассматриваться как с детерминированной точки зрения, так и с вероятностной. В данном случае все зависит от того, в каком масштабе времени рассматриваются элементы водного баланса. Например, при изучении водного баланса за минутные или часовые интервалы связь между элементами водного баланса имеет детерминированный характер и

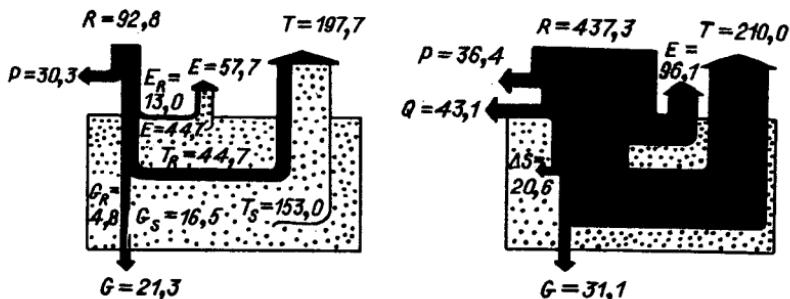
*а**б*

Рис. 1. 3. Структура водного баланса дерново-подзолистых почв под елово-лиственными насаждениями в годы экстремальной водообеспеченности (в мм) в засушливый период (а) и период повышенного увлажнения (б).

$R$  — осадки;  $P$  — перехват осадков растительностью;  $T$  — транспирация,  $T_R$  и  $T_S$  — транспирация за счет влаги осадков и почвенных запасов соответственно;  $E$  — испарение;  $E_R$  и  $E_S$  — испарение за счет влаги осадков и почвенных запасов соответственно;  $Q$  — поверхностный сток;  $G$  — отток влаги из почвы к грунтовым водам;  $G_R$  и  $G_S$  — отток за счет влаги осадков и почвенных запасов соответственно.

описывается системой уравнений (1.5) — (1.16). При рассмотрении годовых (или сезонных) значений в многолетнем аспекте между этими элементами устанавливаются вероятностные связи. В самом деле, между испарением в текущем и предыдущем году никакой детерминированной зависимости быть не может. Скорее всего элементы водного баланса за сезонный интервал времени следует рассматривать как случайные события. Это вытекает из того, что невозможно дать однозначный прогноз о структуре водного баланса в последующие годы. Такую оценку можно получить только с определенной степенью вероятности, из чего, видимо, вытекает случайная природа связи между элементами водного баланса почвы, рассматриваемых за длительные интервалы времени.

Исходя из правил теории вероятностей, составляющие водного баланса (1.21) представляют собой совместные события. Обозначим через  $F(x)$  вероятность появления события  $x$ . Тогда уравнение водного баланса почвы (1.21), согласно теореме сложения вероятностей совместных событий, можно записать в виде

$$F(R - C - Q) = F(E + T + G) + F(\Delta S) - F(E + T + G) \cdot F(\Delta S). \quad (1.22)$$

С помощью метода Монте-Карло и системы уравнений (1.5) — (1.16) разыгрываются все функции распределения, входящие в уравнение (1.22). В качестве объекта исследований выбран Истринский лесо-гидрологический стационар, расположенный в зоне дерново-подзолистых почв с елово-лиственными древостоями. Для условий этого стационара рассчитывалась структура водного баланса почвы в различные климатические ситуации (рис. 1.3). В структуре расходные составляющие водного баланса  $E$ ,  $T$ ,  $G$  расчленены в зависимости от того, как влага осадков и почвенных запасов расходуется на эти составляющие. Для этого использована методика работы [Чеботарев, Соловьев, 1986]. В засушливый период при сумме осадков за летний

сезон 93 мм на испарение и транспирацию израсходовано соответственно 58 и 198 мм. Причем существенную долю в расходные составляющие вносят почвенные влагозапасы. В период повышенного увлажнения экстремальная сумма осадков за летний сезон достигает 437 мм. Этой влаги достаточно не только для восполнения расходных составляющих водного баланса, но и для образования поверхностного стока (43 мм) и пополнения запасов почвенной влаги (21 мм).

Таким образом, полученные результаты моделирования экстремальных гидрологических характеристик свидетельствуют о перспективности динамико-стохастических моделей. Подобного рода модели дают возможность оценить поведение гидрологической системы в экстремальных по водообеспеченности ситуациях, используя при этом данные наблюдений воднобалансовых станций.

#### 1.4. УЧЕТ ЛЕСИСТОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОДНОГО БАЛАНСА В СИСТЕМЕ АТМОСФЕРА—ПОВЕРХНОСТЬ СУШИ

Для крупных территорий, соизмеримых с размерами элементарных ячеек сетки моделей, с достаточно равномерным чередованием лесных массивов и безлесных участков можно, очевидно, записать следующее соотношение:

$$\left. \begin{aligned} P &= (1 - \alpha)P_{f_i} + \alpha P_{f_0}; \\ E_0 &= (1 - \alpha)E_{o_f} + \alpha E_{o_{f_0}}; \\ E &= (1 - \alpha)E_{f_i} + \alpha E_{f_0}; \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

где  $\alpha$  — коэффициент лесистости в долях единицы;  $P_{f_0}$ ,  $E_{o_{f_0}}$ ,  $E_{f_0}$  — соответственно осадки, испаряемость и испарение над лесными массивами;  $P_{f_i}$ ,  $E_{o_{f_i}}$ ,  $E_{f_i}$  — соответственно осадки, испаряемость и испарение над безлесными участками. Под безлесными участками будем понимать все виды подстилающей поверхности (поле, луг, почва и т. д.), исключая лес. Таким образом, система соотношений (1.23) в интегральной форме учитывает воздействие леса на осредненные по достаточно большой площади величины  $P$ ,  $E_0$  и  $E$ .

Естественно, только в степной зоне  $P_{f_i} \rightarrow P$ ,  $E_{o_{f_i}} \rightarrow E_0$  и  $E_{f_i} \rightarrow E$ . В лесной же зоне осадки, испаряемость и испарение над лесными и безлесными участками в теплый период могут заметно различаться. Зимой эти различия выражены значительно слабее.

Для оценки  $P_{f_i}$  и  $E_{o_{f_i}}$  могут быть использованы результаты, полученные при численном моделировании климата. В воднобалансовых исследованиях можно использовать данные со стандартной сети метеорологических станций, но они, как правило, расположены вблизи населенных пунктов на безлесных участках и отражают особенности формирования испаряемости и выпадения осадков лишь над безлесными территориями.

Для определения  $E_{f_i}$  целесообразно использовать уравнение связи между водными балансами атмосферы и поверхности суши [Малинин, 1984], которое применительно к безлесным территориям для

среднемноголетних месячных периодов времени может быть записано в следующем виде:

$$\gamma_{f_i} = \frac{E_{f_i} - P_{f_i}}{P_{f_i}} = \Psi_{f_i} \left( \frac{E_{of_i}}{P_{f_i}} \right),$$

где  $\Psi_{f_i}$  — некоторая функция, зависящая от географической зоны. Если рассматривать лесопокрытые территории, то в этом случае в данное уравнение связи необходимо вводить фазу развития древесной растительности  $\Phi$ , которая существенным образом влияет на процесс испарения, т. е.

$$\gamma_{f_0} = \frac{E_{f_0} - P_{f_0}}{P_{f_0}} = \Psi_{f_0} \left( \frac{E_{of_0}}{P_{f_0}}, \Phi \right). \quad (1.24)$$

Очевидно, нет необходимости в уравнении связи (1.24) учитывать таксационные характеристики лесного покрова (состав леса, его возраст и бонитет), роль которых уменьшается с увеличением площади лесных массивов. Что касается фазы, то ее учет может быть осуществлен следующим образом.

Разделим весь вегетационный период на три промежутка времени, в течение которых процесс испарения является относительно однородным: от начала вегетации до наступления ее наиболее активной части (I); наиболее активная (максимальная) вегетация (II); от конца максимальной вегетации до ее полного окончания (III). В I и III периоды, характеризующие замедленную вегетацию, испаряемость обычно значительно превышает испарение над лесом, в то время как в течение активной вегетации испарение близко к испаряемости. Поэтому применительно к уравнению (1.24) весь вегетационный период может быть условно разделен на две фазы: активной и замедленной вегетации. В качестве критерия, разграничитывающего фазы, можно приближенно принять величину  $\xi_{f_0} = E_{f_0}/E_{of_0} = 0,90$ .

Исходя из анализа экспериментальных оценок испаряемости и осадков над лесом [Раунер, 1972; Федоров, 1977], можно предположить наличие следующего равенства:

$$E_{of_i}/P_{f_i} = E_{of_0}/P_{f_0}, \quad (1.25)$$

которое означает, что коэффициент испаряемости в лесной зоне является практически инвариантным по отношению к любому виду подстилающей поверхности, будь то поле, пашня, луг или лес.

Если, например, принять для среднемноголетнего годового периода приближенные равенства  $E_{of_i} = \bar{R}_{of_i}/L$ ,  $E_{of_0} = \bar{R}_{of_0}/L$  ( $\bar{R}_{of_i}$  и  $\bar{R}_{of_0}$  — соответственно величины радиационного баланса безлесных участков и лесных массивов при условии их достаточного увлажнения) [Будыко, 1978], то выражение (1.24) приобретает вид  $P_{f_0}/P_{f_i} = \bar{R}_{of_0}/\bar{R}_{of_i}$ . Согласно полученному уравнению в среднем за год превышение осадков над лесом соответствует аналогичному превышению радиационного баланса лесных массивов над безлесными участками.

Используя карты величин  $\bar{R}_{of_0}$  [Раунер, 1972] и  $\bar{R}_{of_i}$  [Ефимова, 1977], можно определить их отношение  $\tilde{\nu} = \bar{R}_{of_0}/\bar{R}_{of_i}$ . На территории

ЕТС  $\tilde{v}$  варьирует в сравнительно малых пределах (1,06—1,10) и имеет тенденцию к некоторому увеличению при возрастании коэффициента испаряемости  $E_0/P$ . Указанные оценки  $\tilde{v}$  хорошо согласуются с экспериментальными данными влияния леса на осадки [Рахманов, 1962; Осипов, 1967; Федоров, 1977].

С другой стороны, рассматривая внутригодовое распределение осадков над лесом, имеет место следующее соотношение:

$$\tilde{v} = \frac{1}{12} \left( \sum_{i=1}^{n_1} v_{s_i} + \sum_{i=1}^{n_2} v_{l_i} + \sum_{i=1}^{n_3} v'_{l_i} \right),$$

где  $n_1+n_2+n_3=12$ . В этом выражении первое слагаемое означает превышение твердых осадков над лесом по сравнению с полем ( $n_1$  — продолжительность периода выпадения твердых осадков в месяцах), второе — превышение жидких осадков над лесом при  $X_{f_i}=E_{of_i}/P_{f_i} \leq 1,22$ , третье — превышение жидких осадков над лесом при  $X_{f_i} > 1,22$ . Величины  $v_s$  и  $v_l$  можно принять приближенно постоянными и равными соответственно 1,03 и 1,08, а третье слагаемое представим в виде линейной функции  $v'_a=a_0+a_1X_{f_i}$ , где коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  определены обратным методом. Численные значения  $a_0$  и  $a_1$  составили соответственно 0,10 и 0,96.

Исходя из этих оценок, для теплого периода можно записать следующее выражение:

$$\frac{P_{f_0}}{P_{f_i}} = \begin{cases} 1,08, & X_{f_i} \leq 1,22, \\ 0,96 + 0,1 X_{f_i}, & X_{f_i} \geq 1,22, \end{cases}$$

которое позволяет предвычислить осадки над лесопокрытой территорией.

Как известно, под суммарным испарением с леса обычно понимают сумму испарения под пологом леса  $E_n$ , испарения задержанной кронами деревьев части атмосферных осадков  $E_s$  и транспирации древесной растительности  $E_t$ :  $E_{f_0}=E_n+E_s+E_t$ . В период активной вегетации транспирация составляет существенную часть суммарного испарения и определяется практически лишь климатическими факторами. В связи с этим для условий избыточного и достаточного увлажнения относительное увлажнение над лесом  $\gamma_{f_0}$  можно представить линейной функцией вида  $\gamma_{f_0}=-1+a_{f_0}X_{f_0}$  (если  $X_{f_0} \leq 1,22$  и рассчитывается по формуле  $X_{f_0}=E_{of_0}/P_{f_0}$ ). Исходя из экспериментальных исследований [Молчанов, 1963; Федоров, 1977], можно полагать, что коэффициент  $a_{f_0}$  близок к 1. Для зон хвойных и смешанных лесов примем  $a_{f_0}=0,97$ , а для зоны лиственных лесов и лесостепи —  $a_{f_0}=0,92$ .

Учитывая близкое залегание грунтовых вод к поверхности и наличие у древесной растительности мощной корневой системы, естественно допустить, что суммарное испарение с леса лимитируется запасами почвенной влаги не в такой степени, как испарение с безлесных участков. Поэтому функцию  $\Psi_{f_0}$  при недостаточном увлажнении можно определить из условия, что она занимает некоторое промежу-

точное положение между двумя предельными случаями: а) полное отсутствие лимитирования влагозапасами процесса испарения, при котором  $\gamma_{f_0} = -1 + a_{f_0} X_{f_0}$ ; б) лимитирование процесса испарения влагозапасами, аналогичное безлесным территориям. Это позволило описать функцию  $\Psi_{f_0}$  при недостаточном увлажнении следующим выражением:  $\gamma_{f_0} = a_0 + a_1 \ln X_{f_0}$  (если  $X_{f_0} \geq 1,22$ ). Для зон хвойных и смешанных лесов  $a_0 = -0,07$ ,  $a_1 = 1,26$ , а для зоны лиственных лесов и лесостепи  $a_0 = -0,11$ ,  $a_1 = 1,17$  при  $X_{f_0} = X_{f_i}$ .

В период замедленной вегетации транспирация уже в большей степени зависит от биологических факторов. В первый месяц вегетации она обычно мала, в результате чего испарение с леса оказывается меньше испарения с окружающих безлесных участков, т. е.  $\gamma_{f_0} < \gamma_{f_i}$ . Однако с увеличением радиационного притока тепла величина  $E_{f_0}$ , а следовательно, и  $\gamma_{f_0}$  быстро увеличиваются. После окончания активной вегетации транспирация опять становится незначительной, в результате чего испарение падает.

Поскольку испарение во всех природных зонах (хвойных, смешанных, лиственных лесов и лесостепи) при замедленной вегетации различается незначительно, то нет смысла дифференцировать зоны между собой. Поэтому функция  $\Psi_{f_0}$  может быть описана выражением  $\gamma_{f_0} = -1 + 0,76 X_{f_i}$ , из которого следует, что относительное увлажнение линейно зависит от коэффициента испаряемости как в условиях достаточного, так и недостаточного увлажнения.

В холодный период испарение с хвойных лесов (в основном за счет испарения задержанных кронами деревьев твердых осадков) примерно на 25 % выше, чем испарение на безлесных участках [Федоров, 1977]. Испарение с лиственных лесов мало отличается от испарения на безлесных участках, поэтому приближенно примем  $E_{s_{f_0}} = c E_{s_{f_i}}$ . Для зон хвойных и смешанных лесов  $c = 1,25$ , а для зоны лиственных лесов и лесостепи  $c = 1,00$ . Испарение в холодный период (ноябрь—март) с безлесных участков может быть определено с помощью эмпирических формул П. П. Кузьмина:  $E_{s_{f_i}} = (0,18 + b_1 u) (e_s - e)$ ;  $E_{s_{f_i}} = (0,24 + b_2 u) d$ , где  $u$  — скорость ветра на уровне 10 м,  $e_s$  и  $e$  — упругость водяного пара на поверхности снега и на уровне 2 м соответственно;  $b_1$  и  $b_2$  — региональные параметры, меняющиеся по территории.

Недостатком первой из этих формул является не очень надежное определение величины  $e_s$ . Кроме того, все входящие в указанные формулы параметры являются мгновенными или, в крайнем случае, ежедневными величинами, что не очень удобно при климатических расчетах. Например, при осреднении второй из этих формул во времени имеем следующее выражение:  $E_{s_{f_i}} = b_2 \bar{u} \bar{d} + b_2 \bar{u}' \bar{d}' + 0,24 \bar{d}$ , в котором появляется дополнительный член  $(b_2 \bar{u}' \bar{d}')$ , обусловленный корреляцией скорости ветра и дефицита влажности. В связи с этим более удобной для оценки испарения представляется следующая формула:  $E_{s_{f_i}} = a_1 d^2 + a_2 d u$ , где  $a_1$  — коэффициент эффективности испарения, зависящий от температурных условий и от повторяемости оттепелей;  $a_2$  — ветровой коэффициент, учитывающий относительное влияние скорости ветра на процесс испарения. Установлены числен-

ные значения этих коэффициентов для ЕТС. Западнее линии Архангельск—Вологда—Горький—Пенза—Волгоград для ноября—февраля  $a_1=13$ ,  $a_2=1,6$ , для марта  $a_1=5$ ,  $a_2=1,6$ . Восточнее этой линии для ноября—февраля  $a_1=11$ ,  $a_2=1,3$ , для марта  $a_1=5$ ,  $a_2=1,3$ . Заметим также, что для холодного периода обычно принимают  $E_{sfi}=E_{ofi}$ , т. е. равенство испарения испаряемости.

Для расчета величины  $E_{ofi}$  в теплый период использован модифицированный вариант комплексного метода М. И. Будыко [1971]. Как известно, этот метод предусматривает определение температуры деятельной поверхности  $t_{l_a}$  из уравнения теплового баланса сушки в виде

$$R_{ofi} - B_{fi} = L\rho D (q_s - q) + (\rho C_p D + 4S\sigma t^3) (t_{l_a} - t), \quad (1.26)$$

где  $B_{fi}$  — поток тепла в почву; а все остальные обозначения общепринятые. Рассчитав  $R_{ofi}$  по данным о температуре воздуха, влажности, баллу облачности [Ефимова, 1977] и  $B_{fi}$  по годовой амплитуде температуры [Будыко, 1971], зная  $t$  и  $q$  из метеорологических наблюдений, а также учитывая взаимосвязь  $t_{l_a}$  с  $e_s$  по известной

формуле Магнуса  $e_s = 6,11 \cdot 10^{\frac{235}{235 + t_{l_a}}}$ , из уравнения (1.26) можно найти величины  $t_{l_a}$  и  $q_s$ .

Решение уравнения (1.26) обычно осуществляется с помощью последовательных приближений (метода итераций), что при массовых расчетах создает определенные затруднения. Поэтому воспользуемся более экономичным способом решения уравнения (1.26).

Поскольку в климатологических расчетах достаточно уверенно можно считать  $D=\text{const}$  ( $D=0,63 \text{ см/с}$ ), температуру воздуха, по которой определяется эффективное излучение, принимать постоянной и учитывать численные значения других констант, то графическое решение уравнения получится в виде кривой. Ее аналитический вид может быть получен, например, при аппроксимации степенным полиномом

$t_{l_a} = \sum_{k=0}^m A_k Z^k$ , где  $A_k$  — коэффициенты полинома;  $m$  — показатель степени;  $Z = R_{ofi} - B_{fi} + 30e + 26t$ . С высокой степенью точности (ошибка аппроксимации  $0,00019^\circ\text{C}$ ) можно ограничиться  $m=3$ . Тогда зависимость  $t_{l_a}$  от  $z$  имеет вид  $t_{l_a} = 4,84 \cdot 10^{-2} + 2,78 \cdot 10^{-2}z - 7,32 \cdot 10^{-4}z^2 + 9,85 \cdot 10^{-6}z^3$ .

Вследствие нелинейности формулы Магнуса возникают дополнительные трудности определения осредненных значений  $e_s$ , обусловленные тем, что из уравнения (1.26) находим не мгновенные, а средние за некоторый период (месяц) значения  $t_{l_a}$ . В связи с этим при оценке величин  $e_s$  по средним значениям необходимо учитывать дополнительный член, обусловленный временной корреляцией температуры и влажности и называемый поправкой Ольдекопа, т. е.  $\bar{e}_s = f(t_{l_a}) = f(t_{l_a}) + f(t_{l_a}^*)$ , где  $f(t_{l_a}^*)$  — поправка Ольдекопа. В результате изучения экспериментальных данных было получено следующее соотношение:  $e_s = 1,07f(t_{l_a}) + 0,06$ , которое в неявном виде учитывает поправку Ольдекопа.

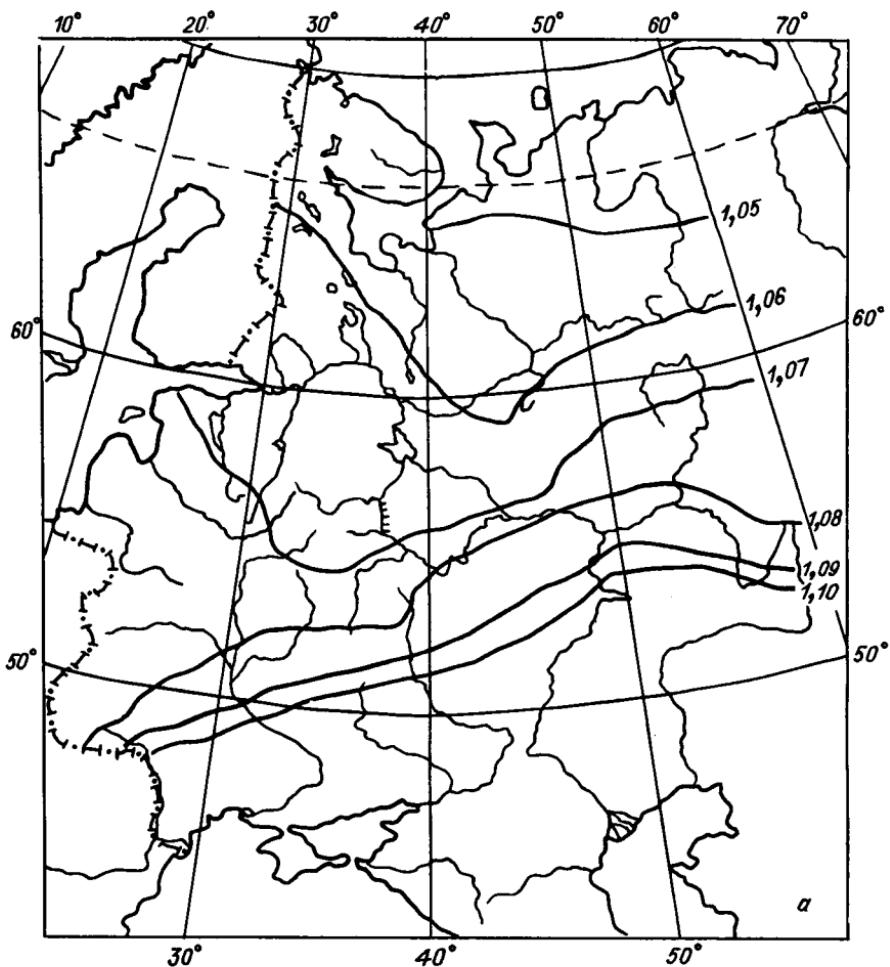


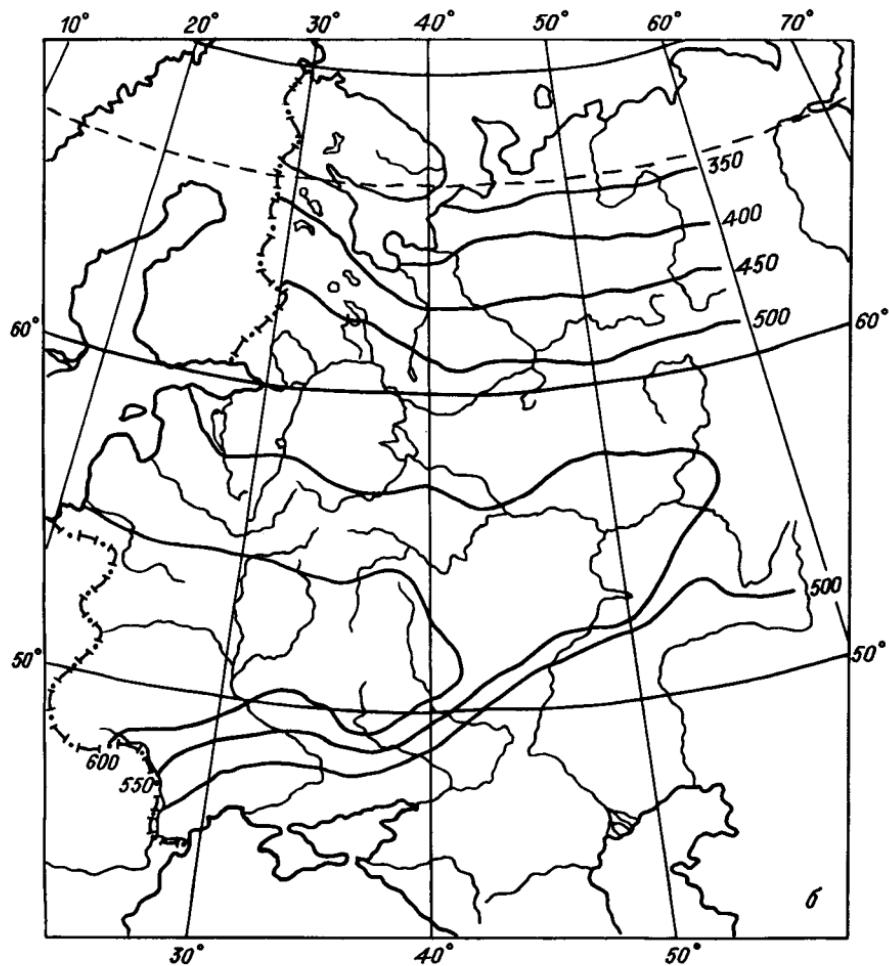
Рис. 1. 4. Распределение соотношения  $\tilde{P}_{fo} / \tilde{P}_{fi}$  (а) и испарения (в мм) над лесопокрытыми территориями (б) для среднегодовых условий на европейской территории СССР.

Исходя из основной формулы комплексного метода  $E_{of_i} = \rho D(q_s - q)$  и принимая во внимание, что  $\rho = 1276(1 - \alpha t) p 1000^{-1}$ , где  $p$  — давление воздуха,  $\alpha = 273^{-1}$ , получим

$$E_{of_i} = \begin{cases} 12,96(1 - \alpha t)(e_s - e), & \text{если } \tau = 30, \\ 13,39(1 - \alpha t)(e_s - e), & \text{если } \tau = 31 \end{cases}$$

( $E_{of_i}$ , мм/мес;  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  — период наблюдений, сут).

Рассмотренная схема предвычисления испарения и осадков над лесопокрытыми территориями была реализована на ЭВМ применительно к европейской территории страны. При этом в качестве основной пространственной единицы принята административная область. Однако если размеры последней превышали  $8 \cdot 10^4 \text{ км}^2$ , то она раз-



бивалась на два района, если были более  $12 \cdot 10^4 \text{ км}^2$ , то — на три района, которые считались самостоятельными пространственными единицами. Исходными данными для теплого периода послужили среднемноголетние месячные значения температуры, влажности воздуха, облачности (в баллах), осадков с поправками к показаниям осадкомера, приведенные в соответствующих «Справочниках по климату СССР», а для зимнего периода — дефицит влажности, скорость ветра и осадки.

Исходя из результатов расчетов была построена серия карт, характеризующая внутригодовое и годовое распределение испарения и осадков над лесопокрытыми территориями (рис. 1.4). На рис. 1.4, а представлены величины  $\tilde{v}$ , характеризующие превышение годовых осадков над лесом по сравнению с безлесными участками. Нетрудно видеть, что над лесом осадков выпадает в среднем на 5—10 %

больше, причем над большей частью ЕТС распределение величин  $\tilde{v}$  весьма однородно и очень незначительно увеличивается к югу. Например, величины  $\tilde{v}$  от Карелии до Карпат увеличиваются всего на 2 %. Наибольшие градиенты  $\tilde{v}$  отмечаются в Волго-Вятском районе, что обусловлено прежде всего большими пространственными градиентами осадков.

Карта испарения за год над лесопокрытыми территориями (см. рис. 1.4, б) в общих чертах удовлетворительно согласуется с аналогичной картой Ю. Л. Раунера [1972]. Однако существуют и определенные различия. На карте Ю. Л. Раунера район максимальных значений испарения, превышающих 650 мм/год, сосредоточен над югом Белоруссии и севером Украины. На нашей карте максимальное испарение, превышающее 600 мм/год, охватывает более обширную территорию: всю Белоруссию (исключая Витебскую обл.), северную и западную части Украины, большую часть Центральночernоземного района.

Наибольшие различия в оценках испарения по двум этим картам для указанных территорий не превышают 50 мм, что составляет менее 10 %. Это свидетельствует о надежности рассмотренной схемы предвычисления испарения над лесопокрытыми территориями.

Соотношение испарения с леса и безлесных участков устанавливается из уравнения связи между водными балансами атмосферы и поверхности суши для среднегодовых периодов времени и безлесных территорий:

$$\tilde{v}_{f_i} = \frac{\tilde{E}_{f_i} - \tilde{P}_{f_i}}{\tilde{P}_{f_i}} = -\frac{\tilde{Q}_{f_i}}{\tilde{P}_{f_i}} = \begin{cases} -1 + 0.9\tilde{x}_{f_i}, & \tilde{x}_{f_i} \leq k, \\ -1 + 1.06\tilde{x}_{f_i}^{-0.06} \operatorname{th} \tilde{x}_{f_i}, & \tilde{x}_{f_i} > k, \end{cases} \quad (1.27)$$

где  $\tilde{Q}_{f_i}$  — речной сток;  $k$  — параметр, разграничающий условия избыточного и достаточного увлажнения ( $k=0.78$ );  $\operatorname{th}$  — гиперболический тангенс.

Из выражения (1.27) следует, что нижним пределом при  $\tilde{E}_{f_i}/\tilde{P}_{f_i}=0$  служит коэффициент стока  $\tilde{Q}_{f_i}/\tilde{P}_{f_i}=-1$ , а верхний предел  $\tilde{Q}_{f_i}/\tilde{P}_{f_i} \rightarrow 0$  при  $\tilde{E}_{f_i}/\tilde{P}_{f_i} \rightarrow \infty$ . В условиях избыточного увлажнения годовое испарение практически линейно зависит от испаряемости, в то время как при прочих условиях увлажнения испарение нелинейным образом зависит от комплекса факторов: испаряемости, осадков и влажности почвы, которая может быть выражена через отношение  $\tilde{P}_{f_i}/\tilde{E}_{f_i}$  [Кулаков, 1975; Волобуев, 1983].

С другой стороны, годовое испарение с леса (см. рис. 1.4, б) может быть вычислено с высокой степенью точности (стандартная ошибка 4 мм/год) на основе следующего соотношения:

$$\tilde{v}_{f_0} = \frac{\tilde{E}_{f_0} - \tilde{P}_{f_0}}{\tilde{P}_{f_0}} = \begin{cases} -1 + 0.96\tilde{x}_{f_0}, & 0 \leq \tilde{x}_{f_0} \leq k, \\ -0.67 + 0.537\tilde{x}_{f_0}, & k < \tilde{x}_{f_0} \leq l, \\ -1 + 1.14\tilde{x}_{f_0}^{-0.15} \operatorname{th} \tilde{x}_{f_0}, & l < \tilde{x}_{f_0} \leq m, \\ -0.05, & m < \tilde{x}_{f_0} \leq n, \end{cases} \quad (1.28)$$

где  $k, l, m, n$  — параметры, соответствующие условиям избыточного,

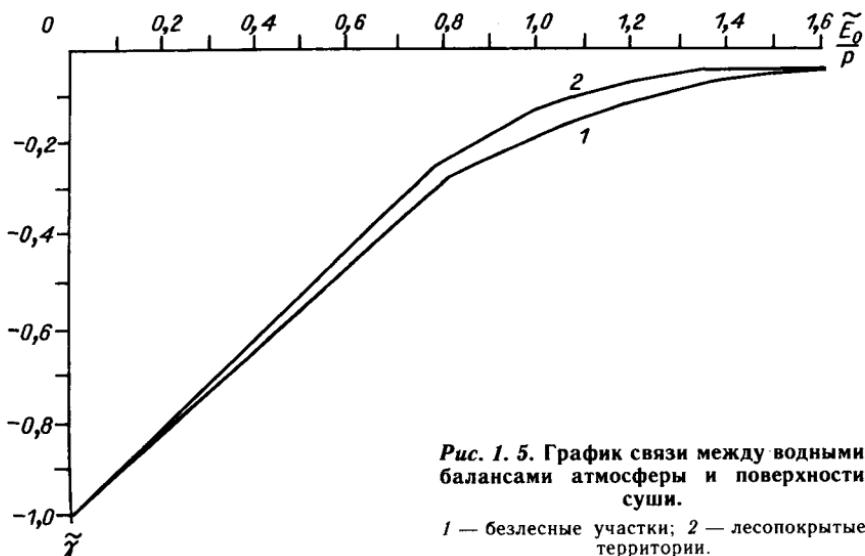


Рис. 1. 5. График связи между водными балансами атмосферы и поверхности суши.

1 — безлесные участки; 2 — лесопокрытые территории.

достаточного, переменного и недостаточного увлажнения ( $k=0,78$ ;  $l=1,0$ ;  $m=1,34$ );  $n$  — критическое значение увлажнения, при котором лес теряет способность к активной транспирации ( $n=1,60$ ). Основной причиной такой дифференциации увлажнения является уровень залегания грунтовых вод.

В интервале  $[0, k]$ , соответствующем зоне хвойных лесов и частично зоне смешанных лесов западной части ЕТС (Прибалтика, северо-западные области РСФСР), годовое испарение с леса, так же как и на безлесных участках, определяется лишь испаряемостью. Это обусловлено достаточно близким залеганием грунтовых вод к поверхности, поэтому лес расходует на испарение столько влаги, сколько позволяют энергетические ресурсы, т. е. испаряемость.

В интервале  $[k, l]$ , характеризующем оставшиеся районы смешанных лесов и большую часть зоны лиственных лесов, испарение уже зависит от двух факторов: испаряемости и осадков, причем, учитывая примерное соответствие указанных факторов, изменения  $\tilde{\gamma}_{f_0}$  происходят линейно.

Интервал  $[l, m]$  свойствен преимущественно лесостепным районам с достаточно глубоким залеганием грунтовых вод, где энергетические ресурсы преобладают над водными (осадками). В этих условиях испарение лимитируется количеством выпавших осадков, в связи с чем рост  $\tilde{\gamma}_{f_0}$  отстает от роста  $\tilde{E}_{of_i}/\tilde{P}_{f_i}$  и зависимость имеет нелинейный характер.

В интервале  $[m, n]$ , соответствующем условиям увлажнения степной зоны, испарение практически не зависит от энергетических ресурсов и определяется количеством выпавших осадков. Поэтому можно принять  $\tilde{\gamma}_{f_0}=\text{const}$ .

График зависимостей (1.27) и (1.28) представлен на рис. 1.5, из которого следует, что практически во всем диапазоне изменений

Таблица 1.7

Годовые нормы элементов водного баланса для лесопокрытых и безлесных территорий некоторых административных областей ЕТС, мм

Область	$\bar{E}_0/P$	$\bar{P}_{f_0}$	$\bar{P}_{f_i}$	$\bar{E}_{f_0}$	$\bar{E}_{f_i}$	$\bar{Q}_{f_0}$	$\bar{Q}_{f_i}$	$\bar{P}_{f_0}/\bar{P}_{f_i}$	$\bar{E}_{f_0}/\bar{E}_{f_i}$	$\bar{Q}_{f_0}/\bar{Q}_{f_i}$
Вологодская	0,67	777	732	501	443	276	289	1,062	1,13	0,96
Псковская	0,75	783	736	572	501	211	235	1,064	1,14	0,90
Минская	0,82	814	762	627	556	187	206	1,068	1,13	0,91
Брянская	0,92	757	702	625	540	132	162	1,079	1,16	0,81
Черниговская	1,04	693	640	617	531	76	109	1,083	1,16	0,70
Воронежская	1,15	682	620	627	536	55	84	1,100	1,17	0,65

Таблица 1.8

Водный баланс речных водосборов с разной лесистостью ( $\alpha$ ), мм

Период, мес	Ветлуга (Воскресенское, $\alpha=0,70$ )						Волга (Углич, $\alpha=0,39$ )						Ока (Кашира, $\alpha=0,29$ )					
	$P_{f_i}$	$P_{f_0}$	$P$	$E_{f_i}$	$E_{f_0}$	$E$	$P_{f_i}$	$P_{f_0}$	$P$	$E_{f_i}$	$E_{f_0}$	$E$	$P_{f_i}$	$P_{f_0}$	$P$	$E_{f_i}$	$E_{f_0}$	$E$
IV	38	41	40	41	38	39	41	44	42	41	37	40	45	49	46	45	44	45
V	51	57	55	73	89	84	54	61	57	77	95	84	58	66	60	84	103	90
VI	70	78	76	94	113	107	76	84	79	96	115	103	71	80	73	97	119	103
VII	80	88	86	97	116	110	86	94	89	100	118	107	83	92	85	103	123	109
VIII	72	78	76	73	85	81	78	84	80	71	82	75	74	80	76	81	94	85
IX	69	74	72	37	33	34	67	72	69	38	34	37	58	63	59	48	47	48
X	66	68	67	15	14	14	58	61	59	17	16	17	53	57	54	21	20	21
IV—X	446	484	472	430	488	469	460	500	475	440	497	463	442	487	453	479	550	501
XI	249	256	254	33	41	39	282	290	285	35	44	38	278	286	280	42	42	42
III																		
Год	695	740	726	463	529	508	742	790	760	475	541	501	720	773	733	521	529	543

$E_{of_i}/P_{f_i}$  испарение с леса превышает испарение с безлесных территорий. Характерные значения  $\bar{E}_{f_0}/\bar{E}_{f_i}$  для некоторых административных областей ЕТС, находящихся в различных условиях увлажнения, приводятся в табл. 1.7. Напротив, речной сток с лесопокрытых территорий несколько ниже стока с безлесных участков, поскольку превышение испарения с леса больше превышения осадков. Известно, что лес осуществляет внутригодовое регулирование стока: уменьшает весенний и увеличивает меженный сток. Учитывая определяющую роль весеннего половодья в формировании годового стока крупных рек с преимущественно снеговым питанием, годовой сток с безлесных территорий должен быть несколько выше стока с лесопокрытых территорий.

Из табл. 1.8 можно установить значительную роль, которую оказывает лесистость территории на формирование водного баланса.

### 1.5. МЕТОДЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА СТОК МАЛЫХ РЕК

В связи с быстрыми темпами развития народного хозяйства СССР, приводящими к непрерывному увеличению потребления вод-

ных ресурсов различными его отраслями, естественный водный режим и водный баланс речных бассейнов претерпевают все большие изменения. Эти изменения особенно велики на малых реках, где весь сток расходуется на местные хозяйствственные нужды или на задержание на водосборах для повышения урожайности сельскохозяйственных культур путем проведения агролесомелиоративных работ, оросительных и осушительных мелиораций.

Водный режим малых рек очень тесно связан с ландшафтной структурой бассейна и поэтому даже незначительное изменение в ландшафте сразу отражается на нем. Малые реки более уязвимы, чем средние и большие. Основная причина состоит в практически одновременном поступлении талых и дождевых вод со всей площади водосбора в русло, в быстром прохождении паводков и в пониженном подземном питании рек в лесной зоне до полного его исчезновения в степной зоне.

В последние годы в связи с проведением комплекса мелиоративных работ (орошение, осушение) гидрологический режим малых рек стал существенно изменяться. В Нечерноземной зоне РСФСР в результате осушения переувлажненных земель сток малых рек почти полностью прекратился. Меженный сток малых рек уменьшается вследствие забора воды на орошение. В засушливые годы вода из некоторых рек разбирается полностью, от чего и возникает противоречие между водо- и землепользователями.

В настоящее время наиболее прогрессивным в исследовании влияния хозяйственной деятельности на сток является направление, основанное на применении ландшафтно-гидрологического принципа, позволяющего разработать наиболее объективные методы оценки влияния каждого вида хозяйственной деятельности на сток и его характеристики. Он позволяет познать физическую сущность процесса преобразования условий формирования стока на водосборах под влиянием хозяйственной деятельности и осуществить его моделирование. Учитывая преимущества данного направления исследований по оценке влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы, рассмотрим принципиальные основы методики учета преобразования речного стока.

В типичных для каждой природной зоны ландшафтах (сельскохозяйственные поля на богаре, на орошаемых и осушаемых землях; леса, лесные полосы; урбанизированные территории) исследуются взаимосвязи изменений элементов водного баланса, обусловленных хозяйственной деятельностью, с факторами, определяющими их формирование (климатическими, почвенными, геоморфологическими и гидрогеологическими). При этом сама оценка влияния хозяйственной деятельности на элементы водного баланса осуществляется на основе применения способов (регрессивный анализ, экспериментальные исследования в полевых и лабораторных условиях и др.), основанных на сопоставлении результатов гидрометеорологических и гидрогеологических исследований различных природных объектов (склонов, пробных участков водосборов) до и после преобразования водного баланса.

Применительно к оценке влияния агролесомелиораций и лесохозяйственных мероприятий связи элементов стока (склонового и грунтового) с факторами, обусловливающими их формирование, характеризуются множественным коэффициентом корреляции в пределах 0,75—0,95 и относительной среднеквадратической ошибкой, не превышающей 12—15 %. Относительно высокие коэффициенты множественной корреляции и низкие среднеквадратические ошибки, не превышающие величины изменений в стоке, позволяют надежно применить ландшафтно-гидрологическое направление для оценки влияния агролесомелиораций и лесохозяйственных мероприятий на склоновый и грунтовый сток [Водогрецкий, 1979].

Модель учета преобразования стока ( $\Delta Y$ ) под влиянием лесохозяйственной деятельности может быть записана в виде

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n (\varphi K_y f_I + \psi K_\omega f_H)_i, \quad (1.29)$$

где  $\sum_{i=1}^n$  — сумма величин изменения в стоке на  $n$  участках;  $\varphi, \psi$  — функции связи изменений соответственно среднемноголетнего склонового и грунтового стока с климатическими, почвенными, геоморфологическими и гидрологическими факторами для начальных условий;  $K_y, K_\omega$  — система коэффициентов перехода от изменений составляющих стока для принятых начальных условий к изменениям в стоке в годы различной водности с учетом реальных соотношений факторов стокообразования на водосборе;  $f_I, f_H$  — доля площади водосборов с преобразованным стоком, имеющих различные уклоны  $I$  и глубины залегания грунтовых вод  $H$ .

При учете влияния отдельных видов хозяйственной деятельности на сток решение уравнения (1.29) осуществляется на основе математического описания зависимостей стока и его изменений под воздействием хозяйственной деятельности от факторов, обусловливающих его формирование, или на основе эмпирических формул, позволяющих произвести расчет изменений стока достаточно надежно.

Учет влияния агротехнических мероприятий, полезащитного лесоразведения и лесохозяйственных мероприятий (сведение леса или его возобновление) на годовой сток малых рек производится в различных районах раздельно в зависимости от характера снежного покрова. При водохозяйственном проектировании для районов с устойчивым снежным покровом такой учет в гидрологических расчетах может быть произведен по следующим формулам:

для лесной зоны

$$\Delta Y_{n(p)} = \sum_{i=1}^n \left[ 0,002 \bar{X} H^{0.52} \left( \frac{2,5}{(H+I)^{0.45}} - 0,06 \right) K_{\omega(p)} K'_\omega K''_\omega f_H \right] \times \\ \times K_{x\omega} - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(\bar{S} + \bar{X})(0,05I^{0.54} + 0,02)}{(I+1)^{0.56}} K_{y(p)} K'_y K''_y f_I \right] K_{xy}, \quad (1.30)$$

$$\Delta Y_{\pi(p)} = \sum_{i=1}^n \left[ 0,027 \bar{X} H^{0.55} \left( \frac{2,5}{(H+1)^{0.45}} - 0,06 \right) K_{\omega(p)} K'_{\omega(n)} f'_H K_t \right]_{\pi} - \\ - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2,58(\bar{S}' - \bar{X})(0,05I^{0,54} + 0,02)}{(I+5)^{0,43}} K_y(p) K'_{y(n)} f'_I \right]_{\pi}; \quad (1.31)$$

для лесостепной зоны

$$\Delta Y_{\pi(p)} = \sum_{i=1}^n \left[ 0,007 \bar{X} H^{0,40} \left( \frac{1,42}{(H+1)^{0,45}} - 0,02 \right) K_{\omega(p)} K'_{\omega} K''_{\omega} f_H \right]_{\pi} + \\ + \sum_{i=1}^n \left[ 0,11 \bar{X} H^{0,27} \left( \frac{1,42}{(H+1)^{0,45}} - 0,02 \right) K_{\omega(p)} K_I K'_{\omega(n)} K_t f_H \right]_{лсн} - \\ - \sum_{i=1}^n [(0,04I^{0,61} + 0,02)(\bar{S}' + \bar{X}) K_z K_y(p) K'_{y(n)} f'_I]_{лсн} - \\ - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{0,78(S + X)(0,04I^{0,61} + 0,02)}{(I+1)^{0,36}} K_y(p) K'_{y} K''_{y} f_I \right]_{\pi} K_{xy}, \quad (1.32)$$

$$\Delta Y_{\pi(p)} = \sum_{i=1}^n \left[ 0,11 \bar{X} H^{0,27} \left( \frac{1,42}{(H+1)^{0,45}} - 0,02 \right) K_{\omega(p)} K'_{\omega(n)} f'_H \right]_{\pi} - \\ - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2,8(\bar{S}' + \bar{X})(0,04I^{0,61} + 0,02)}{(I+0,5)^{0,32}} K_y(p) K'_{y(n)} f'_I \right]_{\pi}, \quad (1.33)$$

где  $\Delta Y_{\pi(p)}$ ,  $\Delta Y_{\pi(p)}$  — показатели изменения годового стока рек под влиянием соответственно агролесомелиораций и лесохозяйственных мероприятий на их водосборах;  $\bar{X}$  — среднемноголетняя сумма осадков за год;  $\bar{S}$  и  $\bar{S}'$  — среднемноголетние максимальные запасы воды в снеге соответственно на сельскохозяйственных полях и на залежи (целине);  $X$  — атмосферные осадки за период склонового стекания;  $[f_i]_{\pi}$ ,  $[f'_i]_{лсн,л}$  — доля площади водосбора под пашней ( $\pi$ ), лесными полосами (лсп) и под лесом ( $л$ ) с уклоном полевых и лесных склонов  $I$ ;  $[f_n]_{\pi}$ ,  $[f'_n]_{лсн,л}$  — доля площади водосбора под теми же угодьями с глубинами залегания грунтовых вод ( $H$ );  $K_y(p)$ ,  $K_{\omega(p)}$  — коэффициенты для вычисления изменений стока (склонового и грунтового) любой заданной вероятности превышения ( $p$ );  $K'_y$ ,  $K'_{\omega}$  — коэффициенты для вычисления изменений стока (склонового и грунтового) на супесчаных и легкосуглинистых почвогрунтах (на суглинистых почвогрунтах коэффициенты равны 1);  $K''_y$ ,  $K''_{\omega}$  — коэффициенты, учитывающие глубину распашки и сопутствующие агротехнические мероприятия;  $K_{xy}$ ,  $K_{x\omega}$  — коэффициенты, учитывающие водность района в пределах природной зоны;  $K_t$  — коэффициент, учитывающий возраст лесонасаждений;  $K_z$  — коэффициент лесных полос, равный 1,4 при поперечном расположении относительно полевых склонов;  $K_I$  — коэффициент, учитывающий влияние уклона склона сельскохозяй-

ственного поля на грунтовый сток под лесными полосами ( $K_l=1,0$  при  $I \leq 20^{\circ}/\text{год}$ ;  $K_l=1,5$  при  $20 < I < 50^{\circ}/\text{год}$  и  $K_l=2,0$  при  $I \geq 50^{\circ}/\text{год}$ );  $f_l$ ,  $f'_l$ ,  $f''_l$  определяются по интегральным кривым распределения площадей с разными уклонами склонов и глубинами до уровня грунтовых вод на суглинистых и супесчаных почвогрунтах в пределах сельскохозяйственных полей, лесных полос и лесонасаждений, в долях от площади водосбора. Кривые распределения площадей строятся по данным топографических, почвенных и гидрологических карт.

Параметры и коэффициенты определяются по картам и таблицам или вычисляются по формулам, приведенным в работах В. Е. Водогрецкого [1979, 1982] и полученным на основе обобщения результатов исследований по оценке влияния агролесомелиоративных мероприятий на сток рек. Они позволяют произвести расчет влияния агролесомелиораций и лесохозяйственных мероприятий на годовой сток и его составляющие с любого участка суши. Для временных водотоков оценка влияний агролесомелиораций производится по формулам (1.30)–(1.33) относительно склоновой составляющей. При этом изменение грунтовой составляющей принимается равным 0.

Кроме этого метода оценки и учета влияния агролесомелиораций на годовой сток дополнительно разработан метод, основанный на результатах анализа испарения с почвы и изменений этой величины в лесоаграрных комплексах [Водогрецкий, 1979]. Согласно уравнению водного баланса, любое изменение суммарного испарения под влиянием сельскохозяйственного освоения территории должно отразиться на годовом стоке. Результаты этих исследований приобретают существенное значение как для оценки достоверности результатов, полученных основным методом, так и для оценки влияния указанных мероприятий в районах с неустойчивым снежным покровом.

Учет изменения суммарного испарения с почвы в связи с агролесомелиоративным освоением территории на конкретном водосборе производится по формулам

$$\Delta E_{n(\rho)} = 0,01 \tilde{E}_u [(\Delta \tilde{E}_y f_y + \Delta \tilde{E}_{oz} f_{oz}) K_{lsp} K_p + \Delta \tilde{E}_{par} f_{par} K'_{lsp} K'_p] K_y'', \quad (1.34)$$

$$\Delta E_{l(\rho)} = 0,01 \tilde{E}_u [(\Delta \tilde{E}_{lx} f_{lx} + \Delta \tilde{E}_{lc} f_{lc}) H < 10 + (\Delta \tilde{E}_{lx} f_{lx} + \Delta \tilde{E}_{lc} f_{lc}) H > 10] K_l K_p, \quad (1.35)$$

где  $\Delta E_{n(\rho)}$  — изменение суммарного испарения на сельскохозяйственных угодьях;  $\tilde{E}_u$  — среднемноголетнее суммарное испарение с целины (залижи, луга);  $\Delta \tilde{E}_y$ ,  $\Delta \tilde{E}_{oz}$ ,  $\Delta \tilde{E}_{par}$  — изменение среднемноголетнего суммарного испарения с угодий соответственно с площади, занятой яровыми ( $f_y$ ), озимыми ( $f_{oz}$ ) культурами и паром ( $f_{par}$ );  $K_{lsp}$  — коэффициент, учитывающий влияние лесных полос на испарение с сельскохозяйственных полей (при площади межполосных полей  $f_{lsp} < 100$  га  $K_l = 0,97$ , при  $f_{lsp} \geq 100$  га или при отсутствии лесных полос  $K_l = 1,00$ );  $K'_{lsp}$  — коэффициент, учитывающий влияние лесных полос на испарение с парового поля и равный 0,90;  $K_y''$  — коэффициент, учитывающий глубину распашки (при глубине менее 25 см  $K_y'' = 1,0$ , при глубине более 25 см  $K_y'' = 1,2$ );  $K_p$  и  $K'_p$  — коэффициенты перехода от среднемноголетних значений  $\Delta \tilde{E}_y$ ,  $\Delta \tilde{E}_{oz}$  и  $\Delta \tilde{E}_{par}$  к значениям тех же величин

в годы различной водности (для многоводных лет ( $p < 25\%$ )  $K_p = 1,6$ ,  $K'_p = 0,90$ ; для маловодных лет ( $p > 75\%$ )  $K_p = 0,50$ ,  $K'_p = 1,40$ );  $\Delta E_{л(p)}$  — изменение испарения с почвы под влиянием леса;  $\Delta E_{лх}$ ,  $\Delta E_{лс}$  — среднемноголетнее изменение испарения с почвы под влиянием соответственно хвойного и смешанного леса;  $f_{лх}$ ,  $f_{лс}$  — площади, занятые соответственно хвойным и смешанным лесом, в долях от площади водосбора в пределах участков с глубиной залегания грунтовых вод от поверхности земли  $H < 10$  м и  $H > 10$  м;  $\Delta E_{ц}$  — испарение с целины (залежи, луга);  $K_t$  — коэффициент, учитывающий влияние на величину  $\Delta E_{л}$  возраста древостоя;  $K_p$  — коэффициент перехода от среднемноголетнего значения  $\Delta E_{л}$  к значениям той же величины в годы различной водности (для многоводных лет ( $p < 25\%$ )  $K_p = 0,3$ ; для маловодных ( $p > 75\%$ )  $K_p = 1,7$ ).

При необходимости расчета изменения стока за конкретный период, например с 1935 по 1980 г., или оценки изменений стока за современный период (1980—1985 гг.) относительных изменений стока за период до 1935 г. (доколхозный этап) расчет по предлагаемым формулам сначала производится за период до 1935 г. с учетом средних площадей под распашкой, под лесными полезащитными полосами или лесом до 1935 г., затем аналогичный расчет повторяется для современного периода. По разности рассчитанных величин определяется изменение стока за 1935—1980 гг.

Структура формул (1.30) — (1.35) позволяет осуществить на практике расчеты вариантов при различных входных параметрах и коэффициентах, определяющих масштаб возможных преобразований в стоке. В результате таких расчетов можно выбрать оптимальный вариант вероятных изменений при водохозяйственном проектировании, удовлетворяющий водо- и землепользователей.

Пример 1. Водосбор р. Карасу (площадь 1500 км<sup>2</sup>, расположен на территории Кустанайской обл.) распахан на 70 %. Распашкой охвачены участки с уклонами склонов более 40 ‰ и глубинами до уровня грунтовых вод более 8 м. Около 40 % площади находится под пашней на суглинистых, остальные — на супесчаных или легкосуглинистых почвах. Расчеты по существующему варианту определили уменьшение среднегодового стока под влиянием распашки водосбора на 4,7 мм, или 26 % годового стока.

Расчеты по второму варианту — с распашкой супесчаных почв склонов с уклонами менее 20 ‰ вместо участков с уклонами более 60 ‰ — определили уменьшение стока под влиянием агромероприятий на 2 мм, или 15 % годового стока. При этом посевная площадь и валовой сбор урожая не изменились.

Расчеты по третьему варианту — с дополнительной посадкой полезащитных лесных полос на площади 15 % от площади водосбора — определили уменьшение стока реки под влиянием агролесомелиораций 1 мм, что составляет 5 % годового стока.

Расчеты по четвертому варианту — с заменой полезащитных лесных полос сплошными лесопосадками на 30 % площади водосбора в приводораздельной зоне на супесчаных почвах — показали значительное уменьшение годового стока — на 41 %. Размещение угодий

на водосборе по этому варианту не удовлетворяет интересам водопользователей и поэтому не может быть рекомендовано в практику. В качестве оптимального в размещении угодий на водосборе принимается третий вариант.

Пример 2. Водосбор р. Черная (площадь 1000 км<sup>2</sup>) расположен в зоне южной тайги и залесен на 100 %. Участки под лесом характеризуются уклонами в пределах 20—100 % и глубинами уровня грунтовых вод в пределах 3—10 м. Около 60 % площади лесов расположено на супесчаных почвах, остальная часть — на суглинках. Река используется для лесосплава и как нерестилище ценных промысловых рыб.

Расчеты по варианту при полной залесенности водосбора показывают, что увеличение стока в реке только за счет залесенности составляет 16 мм, или 13 % годового стока. Вырубка на 40 % площади леса на суглинистых почвах с глубоким залеганием грунтовых вод (10 м и более) и отведение этой территории под сельскохозяйственные угодья снижают сток на 6,5 мм. Наиболее существенное снижение стока (около 11 мм) будет при сведении леса на 60 % площади.

В качестве оптимального в размещении угодий на водосборе р. Черная можно принять четвертый вариант: сведение леса на 40 % площади в приводораздельных частях водосбора; лес остается в виде запретных полос вдоль берегов основной реки и ее притоков. На приводораздельных стокоформирующих склонах водосбора после сведения леса увеличивается интенсивность поступления талых вод в русло в период весеннего половодья и летних паводков, следовательно, сплав леса можно осуществлять без дополнительных затрат на водорегулирование попусками прудов [Пособие . . . , 1984]. Территория, свободная от леса, может быть отведена под сенокосные угодья и в дальнейшем — под сельскохозяйственные поля.

Пример 3. Водосбор лога (без названия, площадь 20 км<sup>2</sup>) расположен в Нижнем Поволжье и распахан на 80 %. Участки под пашней имеют уклоны 30—60 %, участки под залежью (целиной) в приводораздельной зоне характеризуются уклонами в 30 %. После распашки склонов водосбора сток в логу уменьшился более чем на 70 %, а в маловодные годы ( $p=90\%$ ) полностью прекратился. Сокращение площади распашки на 20 % на склонах с уклонами 40 % и отведение под распашку выгонов с уклонами 30 % (второй вариант) способствуют сокращению безвозвратных потерь в стоке на 6 мм, или на 31 %, а следовательно, аккумуляции 300 тыс. м<sup>3</sup> воды в прудах и ликвидации дальнейшей эрозии прирусловых склонов.

Расчеты по третьему варианту расположения угодий на водосборе (70 % площади под пашней и 20 % — под лесными полосами) не обеспечивают сокращение безвозвратных потерь стока, однако приводят к необходимости увеличения урожайности полей на богаре в среднем на 3,5 ц/га.

Аналогичная оптимизация в решении практических задач по учету влияния других видов хозяйственной деятельности (орошение, осушение, урбанизация, русловое регулирование) в комплексе позволит в дальнейшем реализовать общую задачу по рациональному использованию и охране водных ресурсов малых рек.

## 1.6. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЛЕСОВЫРУБОК НА СТОК МАЛЫХ РЕК

Рубки леса оказывают заметное влияние на водность малых рек и тем самым вызывают необходимость корректировки характеристик стока, рассчитанных по действующим нормативам.

Исследование этого влияния для условий Восточной Сибири выполнено на основе данных сетевых гидрометеорологических наблюдений и информации о размерах площадей лесовырубок на водосборах 23 малых рек Ангаро-Енисейского и верхней части Обского бассейнов. Длина этих рек не превышает 200 км, площадь водосбора от 135 до 5000 км<sup>2</sup>, период гидрологических наблюдений 20—40 лет, первоначальная залесенность 70—95 %, изменение залесенности за счет вырубок 10—36 %.

Анализ однородности статистических рядов стоковых характеристик (слои годового, весеннего и дождевого стока, максимальные расходы воды весеннего половодья и дождевых паводков, минимальный 30-дневный сток летней межени) выполнялся статистическими методами. По результатам анализа установлено нарушение однородности только для четырех малых рек — Маны, Бирюсы, Качи, Мал. Кемчуга. Эти реки расположены в одном лесохозяйственном районе. Рельеф бассейнов среднехолмистый и холмистый, почвогрунты суглинистые. На этих реках в 1960—1980 гг. отмечалось увеличение среднего годового стока на 12 %, весеннего на 17, максимального весеннего на 24, максимального дождевого на 40 %, уменьшение минимального 30-дневного летнего стока на 21 %. Антропогенный характер отмеченных изменений водного режима рек очевиден, так как неоднородность климатических факторов не установлена, а факторы подстилающей поверхности изменились в основном за счет лесовырубок.

На основе информации об изменениях водяного режима рек разработаны приемы ориентировочного учета влияния лесовырубок на сток малых рек. В основу расчетных приемов положены связи установленных изменений стандартных статистических параметров неоднородных рядов ( $\Delta\bar{Y}$ ,  $\Delta\bar{Y}_b$ ,  $\Delta\bar{Q}_{m.b}$ ,  $\Delta C_v$ ,  $\Delta C_{vb}$ ,  $\Delta C_Q$ ) с изменением общей залесенности бассейнов ( $\Delta f_L$ ). Здесь  $\Delta\bar{Y}$ ,  $\Delta\bar{Y}_b$ ,  $\Delta\bar{Q}_{m.b}$ ,  $\Delta C_v$ ,  $\Delta C_{vb}$ ,  $\Delta C_Q$  — соответственно изменения средних значений и коэффициентов вариации слоя годового, весеннего стока и максимальных расходов воды весеннего половодья неоднородного ряда относительно этих же характеристик естественного ряда. Степень влияния лесовырубок существенно отличается для рек с различной водностью. Для учета этого фактора изменение статистических параметров рассматривалось в зависимости от средних значений изменения указанных гидрологических характеристик за период с нарушенным режимом ( $\Delta\bar{Y}$ ,  $\Delta\bar{Y}_b$ ,  $\Delta\bar{Q}_{m.b}$ ), отнесенных к среднемноголетним значениям естественного ряда ( $\bar{Y}_e$ ,  $\bar{Y}_b$ ,  $\bar{Q}_{m.b,e}$ ), т. е.

$$\Delta Y = f(K_y); \Delta \bar{Y}_b = f(K_{y.b});$$
$$\Delta \bar{Q}_{m.b} = f(K_q), \text{ где}$$

$$K_y = \frac{\Delta \bar{Y}}{\bar{Y}_e}; \quad K_{yb} = \frac{\Delta \bar{Y}_b}{\bar{Y}_{b,e}}; \quad K_q = \frac{\Delta \bar{Q}_{m,b}}{Q_{m,b,e}}.$$

В свою очередь, относительные значения  $K_y$ ,  $K_{yb}$ ,  $K_q$  увязывались с общим снижением залесенности бассейнов  $\Delta f_n$ .

Для максимальных расходов дождевых паводков установлена связь относительных изменений модуля стока 1%-й обеспеченности для водосбора в  $200 \text{ км}^2$  ( $K_q = \frac{\Delta \bar{q}_{200}}{\bar{q}_{200}}$ ) с общим снижением залесенности бассейнов, т. е.  $K_q = f(\Delta f_n)$ . Переходные коэффициенты  $\lambda_{q,n}$  для определения значений максимальных расходов различной обеспеченности для неоднородного ряда корректируются введением поправочных коэффициентов  $K_{\lambda q}$ , установленных по соотношению переходных коэффициентов  $\lambda_q$  естественного и неоднородного ряда:  $K_{\lambda q} = \frac{\lambda_{q,n}}{\lambda_{q,e}}$ .

Изменение минимального 30-дневного стока рассматривалось в виде поправки  $\Delta q_{min}$ , представляющей собой разность модулей 80%-й обеспеченности естественного ( $q_{min,e}$ ) и неоднородного ряда ( $q_{min,n}$ ). Данная поправка в виде  $K_m = \frac{\Delta q_{80\%}}{q_{80\%e}}$  увязывалась с величиной  $\Delta f_n$ :  $K_m = f(\Delta f_n)$ .

Модули минимального 30-дневного стока различной вероятности превышения в условиях неоднородности рассчитываются через переходные коэффициенты  $\lambda_{q,min}$ , исправленные на неоднородность поправкой  $K_{\lambda m}$ . Поправка определялась по соотношению переходных коэффициентов в условиях естественного и неоднородного ряда

$$K_{\lambda m} = \frac{\lambda_{m,n}}{\lambda_{m,e}}.$$

Таким образом, после установления факта неоднородности гидрологического ряда определение расчетных значений стока рекомендуется выполнять по следующим схемам.

**Расчет годового и весеннего стока** осуществляется в следующей последовательности:

— для нескольких характерных рек района, в бассейнах которых проводятся лесовырубки, определяется среднее за многолетний период изменение годового стока  $\Delta \bar{Y}$  и отношение  $K_y = \frac{\Delta \bar{Y}}{\bar{Y}_e}$ , где  $\bar{Y}_e$  —

среднее значение исследуемой характеристики стока в условиях естественного режима реки. Величина  $\Delta \bar{Y}$  устанавливается по интегральным графическим связям  $\Sigma Y = f(\Sigma x)$ ;

— по лесотехническим данным устанавливается общее уменьшение залесенности бассейна  $\Delta f_n$  (в %) по сравнению с первоначальной;

— по значениям  $K_y$ , рассчитанным для нескольких рек района, строится зависимость  $K_y = f(\Delta f_n)$ ;

— строятся эмпирические кривые обеспеченности для периодов с естественным и нарушенным режимом и общая эмпирическая кривая обеспеченности всего неоднородного ряда (композиционным способом); определяется разность параметров кривых обеспеченности

естественного и неоднородного ряда:  $\Delta\bar{Y} = \bar{Y}_n - \bar{Y}_e$ ,  $\Delta C_v = C_{v_n} - C_{v_e}$ ; — используя значения  $\Delta\bar{Y}$  и  $\Delta C_v$ , установленные для нескольких рек района, строятся зависимости  $\Delta\bar{Y} = f(\Delta\bar{Y})$  и  $\Delta C_v = f(\Delta\bar{Y})$ . Полученные зависимости могут быть использованы для расчета значений стока различной вероятности превышения в условиях осуществленных и планируемых лесовырубок.

Порядок расчета:

- по ряду наблюдений, отражающему естественное состояние реки, устанавливаются значения  $\bar{Y}_e$  и  $C_{v_e}$ ;
- по установленным региональным связям  $K_y = f(\Delta f_n)$  определяется  $\Delta\bar{Y}$  при заданном значении  $\Delta f_n$ :  $\Delta\bar{Y} = K_y \cdot \bar{Y}_e$ ;
- по зависимостям  $\Delta\bar{Y} = f(\Delta Y)$  и  $\Delta C_v = f(\Delta\bar{Y})$  для полученного значения  $\Delta\bar{Y}$  определяются поправки к параметрам кривой обеспеченности общего неоднородного ряда —  $\Delta\bar{Y}$  и  $\Delta C_v$ ;
- вычисляются параметры кривой обеспеченности общего ряда по формулам  $\bar{Y} = \bar{Y}_e + \Delta Y$  и  $C_{v_n} = C_{v_e} + \Delta C_v$ ;
- по вычисленным значениям  $\bar{Y}_n$ ,  $C_{v_n}$  и  $C_s = 2C_v$  известными приемами рассчитываются значения годового стока  $Y_{p\%}$ , отражающие влияние лесовырубок.

Аналогичным образом выполняется анализ и расчет характеристик весеннего стока.

Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков для нескольких малых рек в районе требует выполнения следующих операций:

- устанавливается общее уменьшение залесенности  $\Delta f_n$  по сравнению с первоначальной;
- устанавливаются кривые обеспеченности  $P(Q_{m,q})$  для периодов с естественным и нарушенным режимами, а также для общего неоднородного ряда; определяются модули 1%-й обеспеченности, приведенные к площади водосбора 200 км<sup>2</sup>, и разность значений  $q_{200}$  для естественного и неоднородного ряда:  $\Delta q_{200} = q_{200n} - q_{200e}$ ;
- рассчитывается отношение  $K_{q_{200}} = \frac{\Delta q_{200}}{q_{200}}$ ;

— используя значения  $K_{q_{200}}$  и  $\Delta f_n$ , установленные для малых рек района, строится зависимость  $K_{q_{200}} = f(\Delta f_n)$ ;

— по кривым  $P(Q_{m,q})$  естественного и неоднородного рядов устанавливаются переходные коэффициенты  $\lambda_p$  и  $P=1\%$  к другим обеспеченностям для естественного  $\lambda_{pe}$  и неоднородного ряда  $\lambda_{pn}$ ;

— рассчитываются поправочные коэффициенты  $K_\lambda = \frac{\lambda_{pn}}{\lambda_{pe}}$  и строится

графическая зависимость  $K_\lambda = f(P)$ .

Порядок расчета:

- по имеющемуся ряду наблюдений, отражающему естественное состояние реки, устанавливаются значения  $q_{200e}$  и  $C_{v_e}$ ;
- по установленным региональным зависимостям определяется значение  $\Delta q_{200}$  при заданном значении  $\Delta f_n$ , т. е.  $\Delta q_{200} = q_{200e} + \Delta q_{200}$ ;

— вычисляется значение  $q_{200n}$  неоднородного ряда:  $q_{200n} = q_{200e} + \Delta q_{200}$ ;

— по зависимости  $K_\lambda = f(P\%)$  определяются значения поправок  $K_\lambda$  к переходным коэффициентам  $\lambda_p$  при заданном значении обеспеченности  $P$ , и далее выполняется известным порядком.

**Расчет минимальных 30-дневных расходов воды по нескольким рекам района:**

— устанавливается общее уменьшение залесенности водосбора  $\Delta f_\lambda$ ;

— по кривым обеспеченности  $P(Q_{min})$  естественного и неоднородного ряда определяется значение  $Q_{min} 80\%$  и разность между ними  $\Delta Q_{min} 80\%$  (или  $\Delta q_{min} 80\%$ ), т. е.  $\Delta q_{min} 80\% = q_{80\%e} - q_{80\%n}$ ;

— по данным подобного анализа на нескольких реках устанавливается зависимость  $K_{q_{min}} = \frac{\Delta q_{min} 80\%}{q_{min} 80\%e} = f(\Delta f_\lambda)$ ;

— определяются поправки  $K_\lambda$  к переходным коэффициентам  $\lambda_p$  для вычисления модулей стока различной обеспеченности в условиях неоднородности:  $K_\lambda = \frac{\lambda_n}{\lambda_e}$ .

Порядок расчета  $q_{min p\%}$  неоднородного ряда:

— по имеющемуся ряду наблюдений, отражающему естественные условия формирования стока, устанавливается значение модуля  $q_{min 80\%e}$ .

— определяется предполагаемое снижение залесенности в бассейне  $\Delta f_\lambda$ ;

— используя установленные региональные связи  $K_{q_{min}} = f(\Delta f_\lambda)$ , определяются  $\Delta q_{min} 80\%$  и модуль  $q_{min} 80\%$  перспективного неоднородного ряда:  $\Delta q_{min} 80\% = K_{q_{min}} \cdot q_{80\%e}$ ;  $q_{min} 80\% = q_{min} 80\%e - \Delta q_{min} 80\%$ ;

— по переходным коэффициентам, исправленным для условий неоднородности  $\lambda_{pn} = K_\lambda \lambda_p$ , рассчитываются минимальные 30-дневные модули стока заданной вероятности превышения:  $q_{min p\%} = q_{min 80\%} \times \lambda_{pn}$ .

Переходные коэффициенты  $K_\lambda$  устанавливаются предварительным анализом по группе рек региона.

Предлагаемые рекомендации могут быть использованы лишь для ориентировочных расчетов в условиях лесовырубок.

Влияние лесовырубок на сток малых рек отмечается лишь в определенных природных условиях. Например, на горных реках таких изменений не установлено [Ершова, 1985]. Этот вывод, однако, нельзя распространить на очень малые водотоки с площадью водосбора менее 20 км<sup>2</sup>. Результаты натурных измерений, выполненных в 1982—1985 гг. на нескольких малых водотоках горного и полугорного характера, свидетельствуют об изменении стоковых характеристик и в данных природных условиях. В табл. 1.9 в качестве примера приведены сравнительные данные измерений по двум очень малым бассейнам, имеющим общий водораздел, одинаковую площадь и однородные природные условия, исключая залесенность. В результате

Таблица 1.9

Характеристики водного режима водотоков с разной лесистостью

Водоток—пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Лесистость, %	Период наблюдений, год	Весенний сток			Дождевой сток			
				Слой, мм	Коэффициент стока	Максимальный расход, л/с	Слой, мм	Коэффициент стока	Максимальный расход, л/с	Минимальный модуль, л/(с × км <sup>2</sup> )
Ручей (без назв.) — 45, 5 км Абаканского тракта	0,58	45	1983	176	0,73	205	—	—	10,6	0,36
			1984	109	0,61	206	25,5	0,41	37,1	0,09
Ручей (без назв.) — 2 км ниже Красноярской ГЭС	0,63	100	1983	197	0,82	266	—	—	7,52	0,46
			1984	116	0,65	154	21,7	0,35	36,4	0,27

изменения по причине вырубки характера залегания снежного покрова, интенсивности снеготаяния и водообразования в бассейне устойчиво отмечалось более раннее формирование весеннего половодья; при этом слой и коэффициент стока оказались на 5—15 % ниже значений этих же характеристик для ненарушенного бассейна. Менее определенно можно оценить различия в формировании максимального расхода половодья, поскольку в этом процессе проявляется одновременное действие двух факторов — снегозапасов и характера температурного (теплового) режима в весенний период. При различных сочетаниях их воздействий максимальный расход с нарушенного бассейна может быть и выше и ниже расхода с залесенного бассейна. Однако, учитывая данные измерений по другим малым водотокам с вырубками в бассейнах ( $\Delta f_l = 30—60 \%$ ), можно заключить, что при благоприятных условиях  $Q_{max}$  с нарушенного бассейна увеличивается на 30—40 %.

При формировании дождевых паводков влияние вырубки прослеживается однозначно. Слой и коэффициент дождевого стока увеличиваются на 15—20 %, максимальный расход возрастает на 25—40 %.

Приведенные материалы свидетельствуют и об изменении минимального летнего стока с вырубленных бассейнов. Наблюдается устойчивое, но различное по годам уменьшение минимального суточного стока. Например, в 1983 г. оно составило 22 %, в 1984 г. — 200 %.

В итоге можно предложить следующие ориентировочные оценки изменения стоковых характеристик очень малых водотоков и рек: при вырубках леса на 10—50 % водосборной площади максимальные расходы воды весенних половодий и дождевых паводков обеспеченности менее 25 % увеличиваются на 30—40 %, минимальные расходы воды летней межени уменьшаются на 20 %.

## Г л а в а 2

# ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ РАЗНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗОН

Формирование гидрологических процессов в каждом типе геосистем, в том числе и лесных, определяется всеми влияющими факторами — природными компонентами. В зависимости от их пространственной и временной упорядоченности трансформация поступающих атмосферных осадков имеет свой специфический для анализируемого объекта характер. В то же время однотипные природные образования — геосистемы — обладают многими сходными чертами, в том числе и однородной структурой гидрологических процессов. В главе рассматриваются как существенно различные гидрологические свойства лесных геосистем горного, равнинного и других типов, так и выявляются сходные черты гидрологических процессов.

В то же время следует отметить, что выбор объектов, методов их исследования и анализа полученных результатов в разделах не унифицирован. В одних случаях изучаются типы леса, в других — речные бассейны разного порядка и природной структуры. Не всегда авторы основываются на комплексном подходе к анализу, что приводит к недоучету влияющих факторов и отдельных элементов водного баланса.

В качестве положительного момента следует отметить факт наличия в настоящее время у специалистов новой интересной информации, отражающей особенности гидрологических процессов в лесах различных географических зон. Преимуществом по сравнению с прошлыми исследованиями является большая длительность периода наблюдений, что позволяет применять дополнительно к сравнительному анализу статистический, подтверждающий справедливость сделанных утверждений. В то же время насущной необходимостью является создание новых автоматизированных систем наблюдений и обработки данных, унификация представлений об объектах, поиск новых приемов картографирования пространственных и временных закономерностей. Полученные в ходе экспериментов данные служат основой для создания систем управления гидрологическими свойствами лесных геосистем через изменение других природных компонентов, прежде всего древесного яруса.

## 2.1. ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА НА МАЛЫХ ВОДОСБОРАХ В СРЕДНЕЙ ТАЙГЕ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА

На европейском Севере страны более 65 % площади лесов сосредоточено в подзоне средней тайги. Вместе с тем влияние леса на усло-

Таблица 2.1

## Основные характеристики экспериментальных водосборов

Водосбор	Пло- щадь, га	Средний уклон		Средняя		Длина водото- ка, км	Густота сети, км/км <sup>2</sup>		Лесис- тость, %
		град, мин	°/oo	ширина, км	высота, м над ур. м.		гидро- графи- ческой	речной	
Мая	672	1°56'	33,8	1,6	120	10,2	1,52	0,96	90
Верх. Мая	376	1°21'	23,7	1,6	128	5,8	1,54	0,80	90
Полевой	20	3°15'	56,5	0,3	105	0,4	2,04	1,02	45
Никон-Шор	98	1°59'	34,6	0,5	112	1,5	1,53	1,17	97

вия формирования стока малых рек в этом регионе изучено крайне недостаточно. Комплексные многолетние исследования в этом направлении были проведены в Коми АССР на Ляльском стационаре Союзгипролесхоз, расположенным на водосборе р. Мая — притоке второго порядка р. Вымь. В его пределах выделено три экспериментальных водосбора: «Мая», «Никон-Шор» и «Полевой» (табл. 2.1).

Почвообразующая порода представлена в основном (более 90 %) двучленными отложениями. Глубина залегания водоупорного горизонта до 40 см на 33 % территории, от 40 до 80 см на 32 % и более 80 см на 35 % территории. Преобладают подзолистые почвы (80 % территории).

Водосборы имеют высокую лесистость. Большая часть (51 %) водосбора «Полевой» занята пашней, ежегодно засеваемой кормовыми культурами. Насаждения сосны и ели на этом водосборе расположены главным образом в нижней его части.

В лесах преобладают насаждения хвойных пород (66 %). Листственные представлены главным образом березняками (89 %). Средний состав ельников — 7Е2Б1С, сосновых — 7С2Б1Е и березняков — 7Б20с1С. Наиболее распространены низкополнотные (67 %) насаждения черничной группы типов леса (43 %). Средний класс бонитета IV, 6; средний возраст сосновых 56 лет, ельников 108, березняков 32 года.

На территории водосборов оборудована сеть постоянных пунктов наблюдений за снежным покровом, промерзанием и оттаиванием почвы, влажностью почвы, уровнем верховодки и грунтовых вод, жидкими осадками под пологом ельников. Наблюдения за осадками и температурой воздуха проведены на метеоплощадке, расположенной на лесной прогалине. Период наблюдений с 1974 по 1984 г.

К началу снеготаяния наибольший запас воды в снеге постоянно регистрировался на водосборах «Верхняя Мая» и «Никон-Шор» с лесистостью 90 и 97 % — в среднем 195 и 186 мм. С уменьшением лесистости до 45 % на водосборе «Полевой» запасы воды в снеге снижаются на 12—15 %, составляя в среднем 162 мм.

В лесу наибольшие снегозапасы наблюдались на прогалинах площадью 300—400 м<sup>2</sup>. На пашне (18 га) они были меньше в среднем

Таблица 2.2

Запасы воды в снеге перед снеготаянием (числитель, мм) и коэффициенты снегозапасов (знаменатель)

Год	Обеспеченность снегозапасов, %	Прогалины	Насаждения			Пашня
			ели	сосны	березы	
1978	50	238	158	190	208	172
		1,00	0,67	0,80	0,87	0,72
1980	92	178	139	150	163	133
		1,00	0,78	0,84	0,92	0,75
1981	8	277	207	236	250	214
		1,00	0,75	0,85	0,90	0,77
В среднем за 1978—1984 гг.	—	216	160	187	195	162
		1,00	0,76	0,87	0,95	0,78

на 22 % (табл. 2.2). В порядке убывания коэффициентов снегозапасов насаждения размещаются следующим образом: березняки, сосняки, ельники. В последних запасы воды в снеге близки к таковым на пашне. Отношение снегозапасов в ельниках к снегозапасам на пашне  $K_p$  достаточно тесно коррелирует с полнотой древостоев  $P$ :  $K_p = 1,55 - 1,06P$  (при коэффициенте корреляции  $R = -0,82$ ). Коэффициент снегозапасов — отношение снегозапасов на различных угодьях к наибольшим снегозапасам на водосборе.

Таяние снега на водосборах начинается в одни и те же сроки, но протекает с различной интенсивностью. Наиболее интенсивно тает снег на пашне — 10,8 мм/сут. В березняках при наибольших снегозапасах интенсивность снеготаяния составляет 8,3 мм/сут. В ельниках при меньших снегозапасах таяние снега происходит в 1,2 раза медленнее — 6,8 мм/сут. Это обусловливает почти одинаковый период снеготаяния в насаждениях березы и ели (в среднем 26 сут). На пашне период схода снега на 10 сут меньше, чем в лесу. Следует отметить, что интенсивность снеготаяния в насаждениях, на пашне и прогалинах коррелирует с максимальной суточной температурой воздуха. Связь имеет линейный характер с коэффициентами корреляции 0,73—0,98.

В лесу наибольшее промерзание почвы постоянно отмечалось в ельниках. Здесь ежегодно регистрировались абсолютные максимальные глубины промерзания. На суглинистых почвах максимум составил 100 см, на супесчаных — 138 см (табл. 2.3). Средняя глубина промерзания супесчаных и песчаных почв в ельниках почти в 5 раз больше, чем в березняках и на прогалинах. Средние глубины промерзания суглинистых почв в ельниках и на пашне существенно не отличаются.

Следует отметить, что за период наблюдений в березняках в течение пяти лет имелись участки с непромерзшей почвой. В ельниках это наблюдалось только дважды.

Большие глубины промерзания почвы в ельниках объясняются главным образом менее мощным снежным покровом, что вызвано

Таблица 2.3

## Характеристики промерзания и оттаивание почв (за период 1978—1984 гг.)

Категория земель, насаждения	Глубина промерзания, см		Средний период оттаивания, сут	Интенсивность оттаивания, см/сут						
	максимальная			максимальная			средняя			
	максимальная	средняя		сверху	снизу	общая	сверху	снизу	общая	
<i>Суглинистые почвы</i>										
Ельники	100	35	48	2,2	0,6	2,8	0,8	0,4	1,1	
Пашня	68	34	23	6,1	2,1	6,1	2,7	0,6	2,8	
<i>Супесчаные, песчаные почвы</i>										
Ельники	138	44	52	4,1	0,5	4,2	1,6	0,3	1,7	
Березняки	60	9	30	3,3	0,3	3,3	1,3	0,2	1,2	
Прогалины	49	8	25	2,2	0,8	2,5	0,9	0,4	1,1	

задержанием значительного количества твердых осадков (около 25 %) кронами деревьев. Средняя глубина промерзания почвы ( $\Gamma$ , см) зависит от средней высоты снежного покрова ( $H$ , см), среднего запаса воды в метровом слое почвы ( $B$ , мм) перед снеготаянием и суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха ( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) за октябрь—февраль. Для ельников на суглинистых почвах уравнение регрессии имеет вид  $\Gamma=169,2-1,75H-0,14B+0,01T$  при  $R=0,98$ . Оно составлено для  $H=45-80$  см,  $B=250-410$  мм,  $T=1070-1700$   $^{\circ}\text{C}$ .

Оттаивание почвы на водосборах начинается снизу. Начало оттаивания сверху запаздывает на 4—6 сут. До схода снега оно носит эпизодический характер и несущественно уменьшает мощность промерзшего слоя почвы. Процесс активизируется после схода снега, при этом сверху он протекает интенсивней (см. табл. 2.3). Наиболее быстро оттаивание почвы идет на пашне. Интенсивность оттаивания суглинистых почв здесь достигала 6,1 см/сут (см. табл. 2.3). В среднем она была в 2,5 раза больше, чем в ельниках, что объясняет значительно больший (в среднем на 25 сут) период оттаивания почвы в последнем типе леса.

Наибольшее суточное оттаивание супесчаных и песчаных почв наблюдалось в ельниках. В среднем оно было на 0,5—0,6 см/сут больше, чем в березняках и на прогалинах (см. табл. 2.3). Это происходит потому, что почвы, промерзающие в ельниках на большую глубину, оттаивают позднее (в среднем на 22 сут) при более высокой температуре воздуха и соответственно с большей интенсивностью. Данный вывод согласуется с установленной зависимостью мощности оттаявшего слоя почвы в насаждениях от суммы положительных среднесуточных температур воздуха, которая определяется с даты схода снега. Связь имеет линейный характер с коэффициентами корреляции 0,87—0,98.

Важным условием, определяющим количественные характеристики стока, является степень увлажненности почвы. В 1981—1984 гг.

перед снеготаянием влагозапасы в метровом слое почвы на водосборе «Никон-Шор» составили в среднем около 390 мм, а на «Полевом» — около 310 мм. На первом водосборе они на 32—179 мм (в среднем на 89 мм) превышали наименьшую влагоемкость (НВ=303 мм), а на втором были на 8 мм меньше НВ, равной 318 мм.

В летние сезоны 1983—1984 гг. на водосборе «Никон-Шор» почвы находились в переувлажненном состоянии. Влагозапасы превышали НВ в 1983 г. в среднем на 114 мм, в 1984 г. — на 80 мм. На водосборе «Полевой» в 1983 г. влагозапасы в метровом слое почвы были выше НВ всего на 20 мм, а в 1984 г. здесь наблюдался дефицит влажности — на 13 мм меньше НВ. В эти годы интенсивность аккумуляции влаги в метровом слое почвы составила на «Полевом» 3,2 мм/сут, на «Никон-Шоре» 1,6 мм/сут, а интенсивность уменьшения влагозапасов соответственно 1,6 и 1,8 мм/сут.

В лесу наибольшими влагозапасами отличаются почвы в ельнике-черничнике влажном. В среднем за 1981—1984 гг. они составили: перед снеготаянием 366 мм, по окончании половодья 383, в летний сезон 369 мм. В ельнике-черничнике свежем влагозапасы были на 43—50 мм ниже. Наименьшие запасы воды в почве отмечены в березняке-черничнике свежем и на пашне. Здесь почвенные влагозапасы были почти одинаковыми и по отношению к влагозапасам в почве ельника-черничника влажного составили 80 %, а ельника-черничника свежего — 90 %. Из четырех лет наблюдений дефицит влажности относительно НВ, определяющий потери стока на увлажнение почвогрунта, наблюдался на пашне (29—76 мм) и в березняках (32—78 мм) три года, в ельнике-черничнике свежем (21—22 мм) два года. В ельнике-черничнике влажном влагозапасы в почве были всегда выше НВ.

В наиболее распространенных в средней тайге ельниках-черничниках в 1974—1984 гг. проведены наблюдения за отдельными элементами водного баланса на четырех водобалансовых площадках размером 20×100 м. Одна пара площадок расположена в ельнике-черничнике свежем (ЕЧС), вторая — в ельнике-черничнике влажном (ЕЧВ) (табл. 2.4).

В древостоях выделяются три поколения ели с возрастным интервалом 40 лет. Возраст самого старшего поколения 161—200 лет.

Весной в ельниках формирование стока, как правило, происходит при промерзшей почве или при запасах воды в ней, превышающих влагозапасы при НВ. Первое характерно для ЕЧС, второе — для ЕЧВ. Склоновый и почвенный сток начинается почти одновременно. В весенний период объем стока в ельниках связан с количеством осадков, дефицитом влажности почвы относительно НВ перед снеготаянием и средней глубиной промерзания почвы. Связь между слоем стока и абсолютными значениями этих факторов для ЕЧС хорошо описывается уравнением множественной линейной регрессии ( $R=0,75$ ).

Разнообразные причины обусловливают сильную изменчивость стока по годам наблюдений, о чем свидетельствуют коэффициенты суммарного стока (табл. 2.5).

Таблица 2.4

## Основные характеристики воднобалансовых площадок

Насаждение	Склон		Почва	Средняя глубина залегания водоупора, см	Таксономические показатели			
	Экспозиция	Крутизна			Состав	Средний возраст, лет	Полнота	Класс бонитета
Ельник-черничник свежий	Юго-западная	2°44'	Подзолистая супесчаная на тяжелом суглинике	70	7Е2Б1П ед. С, Ос	120	0,94	IV
Ельник-черничник влажный	Северо-западная	1°06'	Подзолистая суглинистая на тяжелом суглинике	40	8Е1Б1П ед. С	130	0,90	IV

Таблица 2.5

## Коэффициенты весеннего стока в ельниках-черничниках (числитель — экстремальные, знаменатель — средние значения)

Насаждение	Период наблюдений, годы	Сток		
		склоновый	почвенный	суммарный
Ельник-черничник свежий	1974—1984	0,06—0,47 0,32	0,07—0,47 0,30	0,28—0,70 0,59
	1980—1984	0,28—0,47 0,39	0,30—0,47 0,36	0,57—0,79 0,68
Ельник-черничник влажный	1980—1984	0,06—0,23 0,16	0,05—0,36 0,22	0,10—0,54 0,34

В ЕЧВ преобладает почвенный сток. Коэффициент почвенного стока здесь в 1,5 раза больше коэффициента склонового стока. В ЕЧС сток более активен. Особенно сильно выражена разница в коэффициентах склонового стока. В целом за период наблюдений в ЕЧС диапазоны изменения коэффициентов почвенного и склонового стока, а также средние их значения почти одинаковы (см. табл. 2.5). Вместе с тем по годам наблюдений (в зависимости от условий) по объему преобладает почвенный или склоновый сток.

Показатели весеннего стока отличаются по периодам: во время снеготаяния и после схода снега при выпадении жидких осадков. В первый период значения коэффициентов склонового и почвенного стока во многом определяются дефицитом влажности почвы и ее глубиной промерзания перед снеготаянием. В ЕЧС коэффициенты склонового стока, превышающие (на 0,05—0,11) коэффициенты почвенного стока (0,18—0,36), отмечены: при средней глубине промерзания 13 см и влагозапасах в почве выше НВ на 54 мм; средней глубине промерзания более 60 см и влагозапасах, равных НВ. При влагозапасах в почве, близких к НВ, но при глубине промерзания

менее 30 см, коэффициент почвенного стока был на 0,04—0,08 больше коэффициента склонового стока (0,30). Для ЕЧС установлены множественные линейные связи коэффициентов склонового и почвенного стока с дефицитом влажности, глубиной ее промерзания перед снеготаянием и интенсивностью снеготаяния ( $R=0,82$ ). В среднем за период наблюдений в ЕЧВ и ЕЧС коэффициенты склонового стока были равны соответственно 0,16 и 0,38, а почвенного — 0,20 и 0,35. Следует отметить, что склоновый сток, как правило, проходит по промерзшей почве или в лесной подстилке и не является опасным в эрозионном отношении.

После схода снега весной сток в ельниках зависит от количества жидких осадков, уровня стояния верховодки и глубины промерзания почвы перед выпадением осадков. Связь коэффициента суммарного стока с этими показателями для ЕЧС имеет линейный характер ( $R=0,97$ ). Увеличение глубины промерзания, более высокое стояние верховодки при одинаковом количестве осадков приводят к увеличению коэффициента стока. В этот период преобладает почвенный сток. В ЕЧС коэффициент почвенного стока выше (0,54), чем при стоке талых вод (0,35), а коэффициент склонового стока, наоборот, в 4 раза ниже и равен 0,08. После схода снега при выпадении дождей в ЕЧВ склоновый сток отсутствовал, а коэффициент почвенного стока был выше (0,32), чем во время снеготаяния (0,20).

За пять лет наблюдений (1980—1984) в ельниках сток летом был зарегистрирован лишь в 1982 г. В этот год он появлялся дважды. В первом случае его появлению предшествовал длительный (15 сут) дождевой период, в течение которого выпало 35 мм осадков. Второе возникновение стока было вызвано интенсивными осадками, когда в течение 5 сут их сумма под пологом ельников составила 54 мм. Появление стока в летний сезон 1982 г. стало возможным лишь благодаря сильному увлажнению почвы. Влагозапасы в почве были выше НВ. Сток в эти периоды отмечался исключительно в почве. Коэффициент стока в ЕЧС был равен 0,10—0,12, в ЕЧВ — 0,12—0,20.

Основной приходной частью водного баланса ельников (около 75 %) весной является запас воды в снеге (табл. 2.6). В расходной части наиболее представлены сток и испарение осадков, задерживаемых пологом ельников.

В отличие от ельника-черничника свежего во влажном меньше воды расходуется на сток, но значительно больше — на пополнение запасов влаги в почве. За период стока 1984 г. испарение с поверхности снега и почвы на всех воднобалансовых площадках было примерно одинаковым — 36—39 мм, или 18 % приходной части водного баланса. Невязка водного баланса в ЕЧС составила 8 мм (4 % приходной части), а в ЕЧВ, где происходит застой воды в микропонижениях на поверхности почвы, она равна 36 мм (18 %).

В летний сезон основной статьей расхода влаги в ельниках является суммарное испарение. В 1982—1984 гг. его доля в балансе составила 220—332 мм. В 1984 г. из 250 мм, идущих на суммарное испарение, 159 мм (60 %) израсходовано на испарение с поверх-

Таблица 2.6

Водный баланс ельников-черничников за весенний период, мм (числитель — экстремальные, знаменатель — средние значения)

Насаждение	Период наблюдений, годы	Запас воды в снеге перед началом снеготаяния	Твердые и жидкие осадки за период стока	Изменение запасов воды в верхнем слое грунта	Задержание осадков корнями деревьев	Сток			Испарение с поверхности снега (почвы)
						суммарный	склоновый	почвенный	
Ельник-черничник свежий	1976—1984	178—277 222	14—108 57	(—18)—(+ 55) +25	55—126 88	80—148 117	49—69 59	11—98 58	11—82 49
	1980—1984	178—277 203	14—108 74	(—18)—(+ 55) +17	55—98 77	111—148 130	50—65 61	46—98 69	11—82 54
Ельник-черничник влажный	1980—1984	178—277 203	14—104 64	(+31)—(+ 78) +57	41—88 62	11—103 69	3—36 23	8—76 46	60—100 79

Таблица 2.7

Характеристики руслового стока на водосборах в 1979—1984 гг. (числитель — экстремальные, знаменатель — средние значения)

Водосбор	Слой стока, мм				Коэффициенты стока				Летняя межень	
	Половодье	Паводок		Летняя межень	Половодье	Паводок		Летняя межень		
		весенний	летне-осенний			весенний	летне-осенний			
Верх. Мая	150—187 170	12—47 34	5—68 47	4—20 14	0,74—0,80 0,77	0,38—0,80 0,52	0,25—0,40 0,30	0,02—0,14 0,09		
	118—154 137	4—25 16	2—84 36	4—22 14	0,68—0,86 0,73	0,14—0,54 0,30	0,12—0,37 0,21	0,02—0,17 0,09		
Полевой	102—156 128	12—42 33	3—60 30	4—21 13	0,48—0,71 0,50	0,41—0,81 0,61	0,10—0,27 0,18	0,03—0,15 0,08		
	137—188 163	10—57 35	5—69 44	5—22 14	0,68—0,82 0,77	0,36—0,75 0,54	0,26—0,36 0,28	0,02—0,20 0,09		
Никон-Шор										
Мая										

ности почвы. На задержание жидких осадков кронами деревьев приходится в среднем 14 % расходной части.

Замыкающее звено водного баланса водосборов — русловой сток. Анализ данных о фазах гидрологического режима показал следующее.

Половодье на водосборе «Полевой» начинается в среднем на 4 сут раньше, чем на лесных водосборах «Верхняя Мая» и «Никон-Шор». Лишь при частых возвратах холдов на стадии формирования половодья 1978 г. разница составила 15 сут. Пик стока на «Полевом» проходит в среднем на 8 сут раньше. Отношение периода подъема стока к его спаду на всех водосборах одинаково и в среднем составило 1 : 2. Продолжительность половодья на водосборах в среднем за период наблюдений существенно не отличается (34—39 сут). Только при высокой интенсивности снеготаяния на пашне, достигавшей 26 мм/сут, половодье 1979 г. на «Полевом» закончилось на 9 сут раньше, чем на лесных водосборах.

За 1979—1984 гг. русловой сток в половодье на водосборе р. Мая изменялся от 137 до 188 мм (в среднем 163 мм). Почти такие же значения слоя стока получены для водосбора «Верхняя Мая». Последний в отличие от «Полевого» и «Никон-Шора» характеризуется наибольшими значениями коэффициентов и слоя руслового стока (табл. 2.7).

На водосборе «Никон-Шор» при лесистости 97 % наблюдается существенное снижение слоев и коэффициентов руслового стока по сравнению с водосбором «Верхняя Мая», лесистость которого 90 %. Разница в слоях стока в среднем равна 42 мм, в значениях коэффициентов стока — 0,17 (см. табл. 2.7). Это объясняется, по-видимому, различием в характеристике насаждений. На водосборе «Верхняя Мая» преобладают низкополнотные древостои сосны и берескы (73 %), в которых снеготаяние происходит значительно интенсивней, чем в ельниках, произрастающих на 31 % площади водосбора «Никон-Шор». Вследствие этого на водосборе «Верхняя Мая» талая вода единовременно с большей части территории поступает в русловую сеть. При этом значительно снижаются потери стока. В среднем за период наблюдений потери стока в половодье на этом водосборе составили  $51 \pm 4$  мм и были существенно меньше, чем на водосборе «Никон-Шор» ( $81 \pm 9$  мм).

Анализ стока на «Полевом» показывает, что снижение лесистости до 45 % при размещении насаждений в нижней части водосбора, несущественно влияет на сток талых вод. Разница в слоях стока на этом водосборе и водосборе «Верхняя Мая» (в среднем на 33 мм) объясняется разницей в запасах воды, участвующих в формировании половодья. Средние коэффициенты стока почти равны (см. табл. 2.7), а потери стока одинаковы (50 мм). Существенного различия в слоях руслового стока на водосборах «Полевой» и «Никон-Шор» не установлено:  $137 \pm 7$  мм и  $138 \pm 10$  мм соответственно.

В конце половодья после схода снега в результате выпадения жидких осадков на водотоках возникают весенние паводки. Особенно активно они происходят на «Никон-Шоре», о чем свидетельствуют

наибольшие значения коэффициентов руслового стока (см. табл. 2.7). На «Полевом» средние слои и коэффициент стока были почти в 2 раза меньше. Причиной этому является различная степень увлажненности почвы в лесу и на пашне водосбора «Полевой». К концу половодья влагозапасы в метровом слое почвы «Никон-Шора» всегда были выше, а на «Полевом» — близкими к НВ. Поэтому жидкие осадки в конце половодья вызывают на первом водосборе более значительный паводок.

В отличие от весеннего паводка в паводки летне-осеннего сезона разница в слоях и коэффициентах руслового стока на водосборах «Никон-Шор» и «Полевой» была не столь существенной (см. табл. 2.7). Увеличение же значений характеристик стока на водосборе «Верхняя Мая», по-видимому, объясняется наличием на его территории значительных переувлажненных участков и более развитой сетью дорог. В паводки такие места являются основным источником поступления дождевых вод в русловую сеть.

В летнюю межень слой и коэффициенты руслового стока на всех водосборах одинаковы (см. табл. 2.7). Питание водотоков в межень осуществляется главным образом за счет стока грунтовых вод. За период наблюдений в межень он изменялся от 4—7 до 16—22 мм.

Осадки летнего сезона несущественно влияют на изменение запасов грунтовых вод. Выпадение 36—82 мм осадков на водосборах увеличили запасы грунтовых вод только на 0,3—1,9 мм. Следовательно, можно предположить, что в летне-осенние паводки грунтовый сток на водосборах будет равен русловому стоку в летнюю межень. Таким образом, при средней продолжительности летне-осеннего сезона 133 сут грунтовый сток на водосборах «Никон-Шор» и «Полевой» равен 20 мм, что составляет соответственно 32 и 36 % от слоев руслового стока.

В половодья 1983—1984 гг. на этих же водосборах доля грунтового стока была почти одинакова — 17 и 22 мм, что по отношению к слою руслового стока составляет 10—14 %. Остальная часть воды (86—90 %) с водосборов стекает в виде почвенного и склонового стока. Следовательно, на водосборах «Полевой» и «Никон-Шор» с начала половодья до 1.Х общий слой грунтового стока будет почти одинаков (около 40 мм) и составит в среднем 20 % от слоя руслового стока.

Результаты исследований позволяют для средней тайги европейского Севера считать, что при освоении лесных земель сельскохозяйственным производством с целью сохранения водоохранной и водорегулирующей функций леса лесистость малых водосборов (до 100 га) должна быть не ниже 45 %. При этом насаждения следует размещать вдоль водотока. При прогнозе половодья необходимо учитывать представленность различных насаждений на водосборе и особенности их влияния на условия формирования стока. Для повышения водоохранной и водорегулирующей функций таежных лесов с учетом перспективы потребления древесины целесообразно в свежих и влажных типах леса (черничники, долгомошники) выраживать насаждения с преобладанием бересы в возрасте до 40—50 лет.

и с последующим снижением ее участия в составе спелых хвойных древостоев до 20—30 %.

## 2.2. ВЛИЯНИЕ ЛЕСА НА СЛОЙ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕК УКРАИНЫ

Поверхность большей части исследуемой территории равнинная и холмистая, с отдельными возвышенностями: Волынской, Подольской, Приднепровской на западе, Донецким кряжем и Приазовской на юго-востоке; и низменностями: Полесской на севере, Приднепровской в средней части, Причерноморской на юге. На юго-западе поднимаются Карпатские горы (высотой до 2061 м). Климат умеренный, преимущественно континентальный. Осадки по территории распределены крайне неравномерно: их годовое количество на юго-востоке составляет 300—400 мм, тогда как в Карпатах достигает 1200—1600 мм. Почвы преимущественно черноземные (около 50 % территории), подзолистые и каштановые. Северная часть Украины располагается в зоне смешанных лесов, южная и средняя — в лесостепной и степной зонах. Водный режим характеризуется хорошо выраженным весенным половодьем, а также летней и зимней меженью. Дождевые паводки в пределах равнинной территории имеют ливневый характер и охватывают, как правило, небольшие территории. В Карпатах дождевые паводки наблюдаются не только на малых, но и крупных реках, достигая нередко катастрофических размеров.

Формирование весеннего половодья отличается рядом особенностей, связанных с обширностью территории, распределением тепла и влаги, характером подстилающей поверхности. В южных районах в малоснежные зимы, а также под влиянием оттепелей весеннее половодье выражено слабо. На характеристики половодья значительное влияние оказывает залесенность водосборов.

Для установления зависимости годового стока и стока за период весеннего половодья от залесенности имеется ряд подходов: методы водного баланса и сравнения параметров стока с бассейнов, отличающихся различной степенью залесенности, анализ материалов экспериментальных наблюдений на парных водосборах.

Наиболее обоснованным из перечисленных способов является метод водного баланса, но его практическая реализация ограничивается трудностями определения некоторых входящих в баланс составляющих. Использование данных сети гидрологических станций затрудняется тем, что в природе очень редко встречаются однородные в ландшафтном отношении водосборы. Поэтому методы сравнения для установления воздействия каждого из природных факторов на сток в отдельности оказываются не эффективными.

Единого мнения о степени и направленности влияния залесенности на слой стока весеннего половодья нет. Обстоятельно этот вопрос рассматривается В. Е. Водогрецким и Э. А. Зайцевой [1984]. Разноречивость мнений о влиянии леса на весенний сток они объясняют применением несовершенных методик или использованием недостаточного по объему и характеру экспериментального мате-

Таблица 2.8

Характеристики водосборов  
стоковых станций

Станция, водосбор	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средний уклон, %	Лесистость, %
Великоанадольская			
Лог Сухой	0,63	23	0
Дубовый	0,99	24	41
Пасечный	2,19	14	1
Кашлагачик	3,01	16	84
Богуславская			
Балка Лучки	4,80	82	71
Лесная II	0,53	182	91
Лог Лесничий	0,20	169	94
Плоский	0,085	28	0
Придеснянская			
Лог Подлядо	0,12	206	45
Липино	0,12	230	6
Опытный	0,12	20	0
Лесной	0,014	163	100

Таблица 2.9

Статистические параметры рядов  
слоя стока весеннего половодья на  
малых водосборах

Станция, водосбор	Длительность наблюдений, лет	Слой стока, мм	$C_o$	$C_s$
Великоанадольская				
Лог Пасечный	20	12,3	1,09	1,23
Сухой	20	14,9	1,09	1,01
Кашлагачик	19	0,187	1,53	1,30
Дубовый	19	1,65	1,20	1,35
Богуславская				
Балка Лучки	15	8,78	1,14	1,45
Лесная II	15	5,9	1,49	2,08
Лог Лесничий	12	2,59	1,67	1,63
Плоский	15	25,58	1,07	0,53
Придеснянская				
Лог Подлядо	30	38,5	0,80	0,92
Липино	30	45,5	0,65	0,74
Опытный	23	49,5	0,79	0,25
Лесной	21	3,54	2,66	3,05

риала. Для Нечерноземной зоны РСФСР они выделяют две группы водосборов по характеру влияния залесенности на средний слой весеннего стока. К первой группе относятся речные бассейны с относительно глубоким залеганием (более 5 м) грунтовых вод. Слой стока здесь с увеличением залесенности уменьшается. Во вторую группу включили бассейн с неглубоким (в среднем 1—3 м) залеганием грунтовых вод, что способствует быстрому дренированию талых вод в период половодья. При этом объем весеннего стока увеличивается с ростом залесенности водосборов. Водосборы на территории Украины повсеместно могут быть отнесены к первой группе.

Исследования воздействия леса на слой стока весеннего половодья проводились по материалам воднобалансовых станций (Придеснянской, Богуславской и Великоанадольской), в пределах которых имеется по несколько водосборов с различной степенью залесенности (от 0 до 100 %). Сведения о водосборах приведены в табл. 2.8.

Из-за глубокого залегания грунтовых вод сток за период весеннего половодья на всех водосборах (логах и балках) представлен практически его поверхностью составляющей. По каждому водосбору были вычислены по методу моментов среднемноголетние зна-

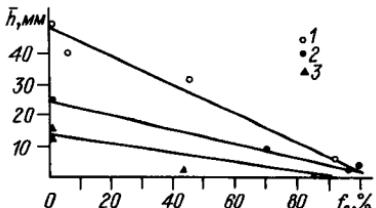


Рис. 2.1. Зависимость среднемноголетнего слоя стока весеннего половодья  $h$  малых водосборов Придеснянской (1), Богуславской (2) и Великоанадольской (3) воднобалансовых станций от залесенности  $f_л$ .

чения слоя стока  $h$ , а также коэффициенты изменчивости  $C_v$  и асимметрии  $C_s$  (табл. 2.9).

Для зависимости средних значений слоя  $h$  от залесенности характерно убывание  $h$  почти до 0 при  $f_л=100\%$  с увеличением залесенности до 100 % (рис. 2.1). Аналогичные зависимости построены и для отдельных лет. Зависимость  $h_л=f(f_л)$  можно выразить в аналитической форме:

$$h_л = h - a'_л f_л$$

где  $h$  — слой стока за период весеннего половодья с открытого водосбора;  $a'_л$  — тангенс угла наклона линии связи к оси абсцисс.

Коэффициент  $a'_л$  определяется значением слоя весеннего половодья (рис. 2.2). Линия связи выходит из начала координат и описывается уравнением

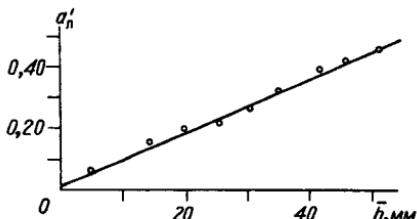
$$a'_л = a_л h_л. \quad (2.2)$$

По данным воднобалансовых станций, коэффициент  $a_л$  равен 0,01 (при выражении залесенности в процентах). Коэффициент залесенности  $k_л$ , представляющий собой отношение  $\frac{h_л}{h}$ , с учетом выражения (2.2) выразится так:  $k_л = 1 - 0,01 f_л$ .

Отметим, что снегозапасы в поле и в лесу на территории каждой из рассматриваемых воднобалансовых станций практически одинаковы. Однородность распределения снегозапасов на открытых и залесенных водосборах проверялась при помощи критерия Стьюдента [Румшинский, 1971]. Сравниваемые между собой среднемноголетние значения снегозапасов ( $\bar{S}$ ) на водосборах с различной степенью залесенности в пределах каждой воднобалансовой станции являются однородными на 5 %-м уровне значимости.

Под влиянием залесенности изменяется и коэффициент вариации (см. табл. 2.8 и 2.9). Причем при  $f_л$  менее 50 %  $C_v$  мало от нее зависит, оставаясь практически постоянным как на открытых, так и на частично залесенных водосборах. Резкое его увеличение имеет место при залесенности, близкой к 100 %. Однако ввиду того что ряды наблюдений по всем водосборам ВБС сравнительно короткие, сделать достоверный вывод о характере связей  $C_v=f(f_л)$  не представляется возможным из-за больших погрешностей при вычислении  $C_v$ . Поэтому в дальнейшем при анализе закономерностей изменения коэффициентов  $C_v$  и  $C_s$  залесенность не учитывалась.

Рис. 2. 2. Зависимость углового коэффициента  $a'_n$  уравнения (2.2) от слоя стока  $\bar{h}$ .



фициентов вариации  $C_v$  и асимметрии  $C_s$  произведено моделирование временных рядов при помощи метода статистических испытаний [Андреянов и др., 1965]. Суть метода состоит

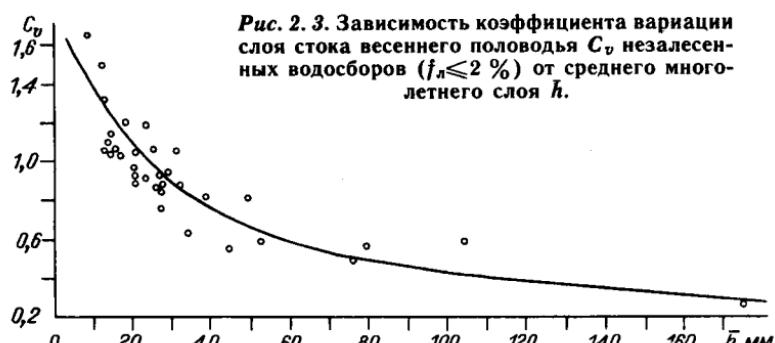
в том, что при известных заданных параметрах среднего,  $C_v$  и  $C_s$  можно произвести генерацию рядов любой продолжительности, используя, например, таблицу чисел Вильямса. Для получения исходных данных, пригодных для моделирования, необходимо, чтобы параметры были между собой взаимоувязаны. На территории Украины были отобраны водосборы с достаточно продолжительными рядами наблюдений (не менее 30 лет), в их пределах лес отсутствовал, либо находился в небольшом количестве (до 2 % от общей площади водосбора). Параметры статистического распределения  $\bar{h}$ ,  $C_v$  и  $C_s$  вычислялись по методу моментов. На рис. 2.3 приводится зависимость коэффициента вариации от  $\bar{h}$ , из него видно, что по мере увеличения увлажненности территории коэффициент вариации уменьшается. Аналитически зависимость  $C_v$  от  $\bar{h}$  представлена уравнением

$$C_v = \frac{5,62}{\bar{h}^{0,64}}. \quad (2.3)$$

На этом же графике были использованы и данные о малых водосборах воднобалансовых станций при  $f_n < 1\%$ . Данные воднобалансовых станций в целом согласуются с общей зависимостью  $C_v = f(\bar{h})$ .

Проверочные расчеты, выполненные по уравнению (2.3), подтверждают удовлетворительное качество полученного выражения. В отличие от  $C_v$  при коротких рядах наблюдений коэффициент асимметрии  $C_s$  целесообразно выражать через его соотношение с  $C_v$  путем осреднения данных по ряду объектов. Так, для рассматриваемой территории в среднем  $C_s = 1,5C_v$ .

Рис. 2. 3. Зависимость коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья  $C_v$  незалесенных водосборов ( $f_n \leq 2\%$ ) от среднего многолетнего слоя  $\bar{h}$ .



Временные ряды весеннего слоя стока при отсутствии залесенности формировались следующим образом. Произвольно задается значение  $h$ . По графику связи  $C_v = f(h)$  по принятому  $h$  снимается  $C_v$ . При этом коэффициент асимметрии  $C_s$  назначается равным  $1,5C_v$ . Метод статистических испытаний предусматривает генерацию рядов как при отсутствии, так и при наличии внутрирядных связей. Практически для всех исходных рядов коэффициенты внутрирядных связей соизмеримы с погрешностями их вычисления, что позволяет, приняв коэффициент внутрирядной связи  $r=0$ , существенно упростить процедуру моделирования.

Длина исходных рядов при различных  $h$  принята равной 3000 членов, что обеспечивает достаточную точность вычисления всех статистических параметров при любой степени залесенности. Влияние залесенности вводилось в полученные ряды по уравнениям (2.1) и (2.2) при  $a_n=0,01$ , после чего ряды подвергались обычной статистической обработке. При этом установлено, что независимо от степени залесенности параметры статистического распределения  $C_v$  и  $C_s$  связи с залесенностью не обнаруживаются. На этом основании можно сделать вывод: залесенность влияет только на слой стока. С другой стороны, при коротких рядах и высокой залесенности коэффициенты вариации и асимметрии определять нецелесообразно из-за возможного их завышения, связанного с приближением среднего к 0.

Проанализировать аналогичным образом материалы сети гидрологических станций не представляется возможным из-за того, что на больших водосборах залесенность находится в сложном сочетании с другими природными факторами. В данной статье для этой цели использован аппарат теории многомерного статистического анализа, и в частности модель факторного анализа, исследующая внутреннюю структуру корреляционных матриц. Впервые факторная модель в гидрологии применена В. И. Бабкиным, О. А. Гусевым и В. А. Румянцевым [1972] при построении расчетной схемы базисного стока.

В общем виде факторная модель может быть представлена уравнением  $Z_{ij} = \sum_{l=1}^k a_{jl} F_{il} + e_j$ , где  $Z_{ij}$  — нормированная величина  $j$  переменной  $i$ -го объекта;  $F$  — факторная нагрузка  $L$ -го обобщенного фактора у  $j$ -й переменной;  $F_{il}$  — значение  $L$ -го обобщенного фактора у  $i$ -го объекта (случайная величина с нулевым средним значением и единичным квадратичным отклонением);  $e_j$  — остатки, учитывающие как остаточную дисперсию, так и связанные с различными погрешностями. Факторная модель дает возможность получить минимальное число новых переменных, являющихся линейными комбинациями исходных, причем эти новые переменные фактически содержат тот же объем информации. Факторный анализ применяется в двух вариантах [Иберла, 1980]: в модификации  $Q$ , позволяющей определять степень взаимной близости  $n$  объектов путем исследования корреляции между  $m$  признаками, и в модификации  $R$ , устанавливающей взаимосвязь между  $m$  признаками и  $r_1$  главными компонентами.

Для решения поставленной задачи — установления степени влияния залесенности на слой стока весеннего половодья рек Украины — применена *R*-модификация. Первоначально в качестве исходных были использованы данные о восьми характеристиках речных бассейнов: среднемноголетнем слое стока весеннего половодья ( $\bar{h}$ ); площадях водосборов ( $\lg(F+1)$ ); средней высоте водосборов ( $H_{cp}$ ); залесенности ( $f_l$ ); заболоченности ( $f_b$ ); озерности ( $f_o$ ); распаханности ( $f_p$ ), а также широтном положении водосборов ( $\bar{\phi}$ ) ( $\bar{\phi}$  представляет собой разность между широтой каждого гидрометрического створа и широтой условной точки отсчета, принятой равной  $48^\circ$ ). На основе матрицы корреляции перечисленных характеристик установлено, что распаханность, имея высокую корреляцию с залесенностью, заболоченностью и широтой местности, самостоятельного интереса не представляет, а площадь водосбора практически не оказывает влияния на слой стока. Поэтому в дальнейшем в факторной модели использованы только шесть характеристик. Выделение обобщенных факторов производилось для отдельных районов. Согласно В. И. Бабкину и др. [1972], на исследуемой территории можно выделить четыре района: Днестровский, Азовско-Черноморский, Карпатский и Днепро-Донской. Поскольку в гидрологических ежегодниках сведения о географическом положении водосборов (широта и долгота) приведены не по всем объектам, на этапе выделения обобщенных факторов и определения факторных нагрузок учтены данные только по 114 водосборам из 208.

Значения факторных нагрузок  $a_{jl}$  получены по компонентам собственных векторов матрицы корреляции признаков. Найденная для районов система факторных нагрузок затем подвергалась ортогональному вращению методом «варимакс» [Иберла, 1980], что позволило в итоге получить более простую структуру для дальнейшей интерпретации обобщенных факторов.

Число эффективных факторов  $k$  (наибольшее число гипотетических переменных, объясняющих корреляцию какой-либо матрицы) контролировалось соотношением Д. Лоули и А. Максвелла [1967]  $(p+k) < (p-k)^2$ , где  $p$  — число переменных  $Z_j$ ;  $k$  — число факторов. Всего выделено три обобщенных фактора, объясняющих более чем на 80 % дисперсию исходной информации.

Линейные расчетные уравнения среднемноголетнего значения слоя стока половодья  $\bar{h}$  имеют следующий вид:

для Днестровского района

$$\bar{h} = 25,9 + 0,005H_{cp} + 18,5\bar{\phi} - 0,68f_l - 0,74f_b; \quad (2.4)$$

для Азовско-Черноморского

$$\bar{h} = 32,6 + 0,65H_{cp} - 25,3\bar{\phi} - 0,62f_l; \quad (2.5)$$

для Карпатского

$$\bar{h} = 212 + 0,19H_{cp} - 122\bar{\phi} - 1,95f_l; \quad (2.6)$$

для Днепро-Донского

$$\bar{h} = 17,1 + 0,021H_{cp} + 14,8\bar{\phi} - 0,34f_l - 1,56f_b, \quad (2.7)$$

где  $\bar{h}$  — слой стока, мм;  $H_{cp}$  — средняя высота водосбора, м;  $f_l$

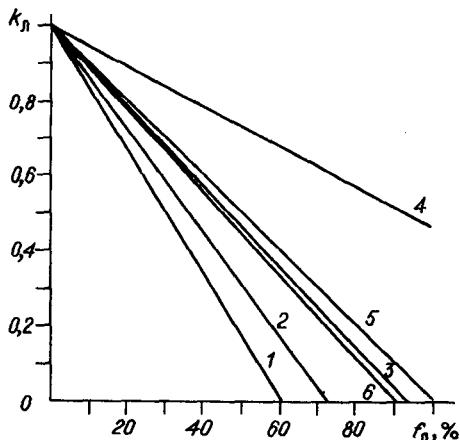


Рис. 2. 4. Зависимость коэффициентов  $k_l$  от залесенности  $f_l$ .

Районы: 1 — Днестровский, 2 — Азовско-Черноморский, 3 — Карпатский, 4 — Днепро-Донской; воднобалансовые станции: 5 — Богуславская, Придеснянская, 6 — Великоандольская.

и  $f_b$  — залесенность и заболоченность, %;  $\phi \approx 48^\circ$  — широта замыкающего створа, град (в Азовско-Черноморском районе  $\phi$  имеет как положительные, так и отрицательные значения). По всей совокупности исходной информации выполнены проверочные расчеты. Критерий качества  $S_0/\sigma$  ( $S_0$  — среднеквадратическая ошибка расчета,  $\sigma$  —

среднеквадратическое отклонение от нормы) указывает на удовлетворительную сходимость расчетных величин с исходными данными и изменяется от 0,31 (Азовско-Черноморский район) до 0,66 (Карпатский).

Конечно, непосредственно из уравнений (2.4) — (2.7) трудно составить представление о степени влияния залесенности на слой стока весеннего половодья, но вместе с тем очевидно, что  $h$  с увеличением залесенности в общем уменьшается.

Чтобы проследить зависимость  $h$  во всем диапазоне значений залесенности, была выполнена имитационная прогонка уравнений (2.4) — (2.7) по конкретным водосборам при фиксированных параметрах  $H_{cp}$ ,  $\phi$ ,  $f_b$  и варьировании залесенности от 0 до 100 %. Для наглядности и удобства представления материала на рис. 2.4 приводятся районные (линии 1 — 4) зависимости коэффициента влияния залесенности  $k_l = \frac{h_{f_b}}{h}$  ( $h_{f_b}$  — слой стока на залесенном водосборе)

на слой стока весеннего половодья от  $f_l$ . На этот же график нанесены и полученные ранее аналогичные зависимости по материалам воднобалансовых станций. Как видно из рис. 2.4, наиболее сильное влияние на слой стока весеннего половодья залесенность оказывает в южной половине территории. Несколько меньшее воздействие на сток обнаруживается в Карпатах. Редуцирующий эффект залесенности в Днепро-Донском районе самый низкий, где даже при  $f_l = 100\%$  коэффициент залесенности не опускается ниже 0,5, тогда как в Днестровском и Азовско-Черноморском районах он достигает нулевых значений уже при залесенности порядка 60—75 %. Большие значения коэффициентов  $k_l$  в Днепро-Донском районе, по всей вероятности, обусловлены более высоким, чем в других районах рассматриваемой территории, уровнем стояния грунтовых вод.

## 2.3. ВОДООХРАННАЯ И ВОДОРЕГУЛИРУЮЩАЯ РОЛЬ ГОРНЫХ ЛЕСОВ КАРПАТ

Природные особенности горных территорий (резкопересеченный рельеф, маломощные почвы, ливневые осадки) обусловливают здесь частое возникновение паводков, нередко сопровождающихся эрозией почв и селевыми потоками. Бурные паводки на реках сменяются периодами крайне низких расходов воды, когда сток бывает в 2000 раз меньше, чем в паводки, что, в свою очередь, сказывается на ритмичности водообеспечения различных отраслей народного хозяйства. В этих условиях усиление водорегулирующей роли горных лесов имеет важное практическое значение. Наиболее актуален этот вопрос для центральной и особенно северо-восточной частей Карпат, на которые приходится 86 % очагов катастрофических осадков горного региона [Голуб, 1971]. Здесь доминируют еловые и смешанные (из ели, пихты и бук) леса.

В избыточно увлажненных горных ландшафтах водорегулирующие свойства леса в значительной мере зависят от способности лесного полога задерживать осадки, а также способности лесной почвы переводить воду во внутрив почвенный и грунтовый сток. При оптимальном сочетании этих факторов резко уменьшается поверхностный, паводковый сток в увлажненные периоды года и возрастает грунтовое питание рек в сухие сезоны.

В горах, даже на сравнительно малых площадях, наблюдается вертикальная поясность климата, почв и растительности, что в сочетании с различной экспозицией и крутизной склонов, а также ориентацией горных хребтов относительно влагоносных воздушных течений существенно сказывается на распределении атмосферного увлажнения, составляющих водного баланса, в том числе стока рек. Воздействие различных факторов на речной сток может маскировать влияние лесного покрова.

С целью оценки водорегулирующих свойств горных лесов в 1972—1985 гг. было проведено изучение осадков, снежного покрова, физических и водных свойств почв в лесу и на открытых участках, а также режима стока с различных по лесистости горных водосборов. Исследования проводились на лесогидрологическом стационаре «Хрипелев», который находится в северо-восточной части Карпат в бассейне р. Быстрица Надворнянская. Стационар расположен на высотах 840—1225 м над ур. м. и состоит из трех граничащих между собой водосборов общей площадью 96,7 га. Слоны характеризуются крутизной 10—35°. Почвы темно-бурые горно-лесные щебнистые мощностью 60—100 см. Лесной покров стационара представлен спелыми еловыми насаждениями, средний состав которых 7Е2Бк1П, класс бонитета I—II, полнота 0,8—0,9. В 1974 г. на водосборе № 3 после сплошнолесосечной рубки посажены хвойные культуры. В 1982 г. на водосборе № 1 проведена добровольно-выборочная рубка, снизившая полноту древостоя до 0,6—0,7. На водосборе № 2 хозяйствственные мероприятия не проводились. Верхняя приводораздельная часть стационара (11 % его площади) занята сенокосами и пастбищами.

Таблица 2.10

Количество осадков на открытом месте (числитель) и проникших под полог ( знаменатель) леса, мм

Гидрологический год	Год	Теплый период (май—октябрь)	Холодный период (ноябрь—апрель)
1971/72	1124/792	795/577	329/215
1972/73	1291/нет данных	1002/794	289/нет данных
1973/74	1228/874	1032/773	196/101
1974/75	1254/943	931/749	323/194
1975/76	1240/936	887/689	353/247
1976/77	1272/968	782/621	490/347
1977/78	1156/880	823/644	333/236
1978/79	928/683	609/472	319/211
1979/80	1430/1066	1023/782	407/284
1980/81	1035/782	706/553	329/229
1981/82	1164/885	668/518	496/367
1982/83	1180/908	886/705	294/203
1983/84	899/654	611/456	288/198
1984/85	1111/834	812/622	299/212
В среднем *...	1156/862	813/628	343/234
То же, %	100/74,6	100/77,2	100/68,2

\* Без учета данных 1972/73 гидрологического года.

При исследованиях в основном использованы методики Гидрометеослужбы СССР. Осадки учитывались ежедневно на поляне при ПОМОЩИ ОСАДКОМЕРА ТРЕТЬЯКОВА И ПЛЮВИОГРАФА, а под пологом леса (водосбор № 2) по 15 осадкомерам. Наблюдения за снежным покровом проводились на поляне и в лесу на двух параллельных снегомерных маршрутах, заложенных поперек склона. После сплошной рубки в 1974 г. на водосборе № 3 снегомерные маршруты проходили и по вырубке. При снегомерных съемках одновременно измерялась и глубина промерзания почв методом шурфования. Физические и водные свойства почв определялись общепринятыми методами.

Исследования показали, что леса Карпат играют важную водорегулирующую роль. В значительной мере это сказывается на уменьшении осадков, поступающих к поверхности почвы в лесу (табл. 2.10). На стационаре «Хрипелев» из 1156 мм, выпадающих в среднем за год осадков, под полог смешанных насаждений с преобладанием ели поступает около 75 %, пологом задерживается 294 мм (25 %). В холодный период года, когда преобладают твердые осадки, доля проникшей под полог влаги снижается до 68 %, а в теплый период в связи с частыми обильными и ливневыми дождями увеличивается до 77 %. Согласно литературным данным [Чубатый, 1972; Дьяков, 1976], полог чистых еловых насаждений Карпат задерживает за год от 44 до 36 % осадков, а буковых — 16—21 %. Таким образом, в условиях избыточного увлажнения Карпат наибольшее количество атмосферной влаги задерживается пологом чистых ельников, меньше — смешанных темнохвойно-буковых насаждений и самое незначительное — чистых буковых лесов. Увеличение доли бук в составе насаждений снижает осадко задерживающую способность их полога.

Таблица 2.11

Характеристики весеннего снеготаяния на открытом месте (числитель) и под пологом леса (знакомитель)

Гидрологический год	Запас воды в снеге, мм	Интенсивность, мм/сут	Продолжительность, сут
1971/72	120/81	2,7/1,8	48/35
1972/73	160/78	9,6/6,5	17/11
1973/74	82/38	Снег сошел зимой	
1974/75	109/63	7,3/6,3	15/10
1975/76	158/89	6,9/4,0	20/20
1976/77	31/7	Снег сошел зимой	
1977/78	135/60	11,7/5,0	11/9
1978/79	119/63	4,5/0,6	18/10
1979/80	134/72	7,3/4,7	14/14
1980/81	176/141	6,8/3,4	18/16
1981/82	134/61	8,9/5,2	16/10
1982/83	103/62	10,3/4,9	11/9
1983/84	181/116	12,0/8,9	15/13
1984/85	139/76	8,2/2,7	17/17
В среднем...	127/72	8,0/4,5	18/15
То же, %	100/56,9	100/56,3	100/83,3

Анализ проникших под полог леса осадков показывает, что в результате увеличения дождя ( $X$ , мм) уменьшается пространственное варьирование проникших сквозь полог осадков ( $C_v$ , %) и возрастает количество проникшей влаги ( $X_{акт}$ , %):

$$C_v = \frac{60,81}{X^{0,448}} \text{ при } R=0,72 \pm 0,06;$$

$$X_{акт} = 36,3X^{0,196} \text{ при } R=0,73 \pm 0,06.$$

Осадкорегулирующие свойства лесного полога в условиях стационара лучше проявляются при дождях до 40 мм, когда задержание влаги превышает 25 %. Механизм регулирования поступления влаги пологом леса сохраняется при дождях до 175 мм. (В Карпатах количество дождевых осадков за сутки может достигать 240 мм.)

В изучаемом районе немаловажную роль играет лес в накоплении и таянии снежного покрова, с которыми связаны объем и интенсивность прохождения весеннего половодья. В период максимального снегонакопления высота снежного покрова в лесу на 1/3 меньше, чем на поляне, а запасы воды в нем соответственно меньше почти в 2 раза (табл. 2.11). Расчеты показали, что в период снегонакопления запасы воды в снеге в лесу меньше по сравнению с открытыми местами на величину, примерно равную количеству осадков, перехваченных пологом леса [Олийник, 1979].

Согласно литературным данным [Шпак, Булавская, 1967; Чубатый, 1968], мощность снежного покрова в буковых насаждениях и на открытых участках мало отличается. Это связано с тем, что зимой буковые древостои оказывают незначительное влияние на проникновение твердых осадков.

Интенсивность таяния снега весной колеблется на открытых участках в зависимости от погодных условий от 2,7 до 12,0 мм/сут, а в лесу от 0,6 до 8,9 мм/сут (см. табл. 2.11). Однако в связи с тем что под пологом леса снега накапливается почти в 2 раза меньше, чем на открытых участках, показатели продолжительности снеготаяния в лесу и на открытых участках весьма близки, в отдельные годы снег в лесу сходит на несколько дней раньше. Это свидетельствует о том, что в горных условиях Карпат может наблюдаться обратная закономерность в сроках схода снега в лесу и на открытых участках по сравнению с равнинными условиями, где снег, как правило, раньше исчезает на открытой местности. Подобные закономерности в формировании и таянии снежного покрова наблюдаются также в еловых лесах Тянь-Шаня [Чешев, Черных, 1977].

Положительное водорегулирующее воздействие леса во многом определяется способностью лесных почв поглощать осадки, проникшие под полог леса, и переводить поверхностный сток во внутрипочвенный и грунтовый. По мнению М. И. Львовича [1963], в лесном биогеоценозе почва является главным компонентом, влияющим на его водный режим. Бурые горно-лесные щебнистые почвы Карпат обладают хорошими водными, физическими и тепловыми свойствами. Достаточное и избыточное увлажнение обуславливает относительную **СТАБИЛЬНОСТЬ ВЛАГОЗАПАСОВ ПОЧВ**. Так, **МНОГОЛЕТНИЕ наблюдения** на стационаре показывают, что в лесу амплитуда колебания запасов влаги в 60-сантиметровом слое почв, где сосредоточено 92—99 % массы древесных корней, составляет 62 мм, что не превышает 35 % от их средней величины. В условиях мягких зимних сезонов в связи с теплоизоляционным влиянием лесного полога и подстилки промерзание почв в лесу, как правило, кратковременное (в среднем 53 дня) с максимальной глубиной в отдельные годы 0—25 см. На открытых участках (вырубка, поляна) глубина промерзания колеблется от 4 до 28 см, а средняя продолжительность существования мерзлого слоя 81 день. По сравнению с нелесными почвами почвы под насаждениями имеют меньшую плотность и более высокие показатели скважности и влагоемкости (табл. 2.12). Более существенно различаются эти почвы по водопроницаемости. В насаждениях поверхностное впитывание влаги в почву составляет 9—35 мм/мин, а на сенокосном угодье — 0,5 мм/мин, нередко снижаясь до 0,2 мм/мин. Поскольку в Карпатах интенсивность ливневых дождей может превышать 1,1 мм/мин, достигая в отдельных случаях 9 мм/мин [Голуб, 1971], поверхностный сток в основном формируется на безлесных угодьях. В лесу из-за высокой водопроницаемости почв избыток влаги переводится лесной подстилкой и почвой в грунтовый и внутрипочвенный сток.

Положительно влияя на осадки, снегозапасы и свойства почвы, лесной покров в условиях Карпат играет чрезвычайно важную роль в улучшении режима речного стока. Влияние леса на режим и сток оценивалось по материалам 40 водосборов. Площади водосборов 2—740 км<sup>2</sup>, высоты изменяются от 610 до 1200 м над ур. м., лесистость 12—97 %. Лесной покров водосборов представлен еловыми, смешан-

Таблица 2.12

## Водно-физические свойства почв сенокосного угодья и леса

Глубина, см	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скважность, %	Полная влагоемкость, %	Глубина, см	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скважность, %	Полная влагоемкость, %
<b>Сенокос</b>							
0—10	0,96	60,2	62,8	0—10	0,80	67,4	84,2
10—20	1,03	59,4	57,9	10—20	0,88	65,6	74,7
20—30	1,11	56,6	51,1	20—30	1,02	60,3	59,2
30—40	1,21	53,5	44,1	30—40	1,17	54,3	46,3
40—50	1,37	47,9	35,0	40—50	1,26	51,0	40,4
50—60	1,39	47,5	34,2	50—60	1,30	49,6	38,4
<b>Лес</b>							

ными из бука, пихты и ели насаждениями, реже буковыми древостоями близкой возрастной структуры.

Стокорегулирующее влияние леса прослеживается через связь между коэффициентом естественной зарегулированности стока  $\phi$  и лесистостью водосборов  $f_l$ , которая характеризуется следующим уравнением:  $\phi = 0,028f_l + 0,28$  при  $R = 0,66 \pm 0,11$ .

Согласно полученному уравнению, лес в Карпатах способствует увеличению зарегулированности стока рек. Весьма существенная роль леса в увеличении стока в меженные периоды, когда происходит обмеление рек и их водность определяется исключительно грунтовым и подземным питанием. В такие периоды речной сток под влиянием леса может возрастать более чем в 12 раз. В данном случае связь между минимальными модулями стока  $M_{\min}$  (в л/(с · км<sup>2</sup>)) и лесистостью (в %) водосборов, как и в предыдущем уравнении, прямая и выражается формулой  $M_{\min} = 0,03f_l + 0,26$  при  $R = 0,66 \pm 0,10$ .

В противоположность приведенным уравнениям связь между максимальными (паводковыми) модулями стока  $M_{\max}$  (в л/(с · км<sup>2</sup>)) и лесистостью (в %) водосборов имеет криволинейный вид:  $M_{\max} = \frac{2805}{f_l + 0,427}$  при  $R = 0,84 \pm 0,05$ . Согласно данному урав-

нению, лесной покров способен уменьшить более чем в 7 раз максимальный речной сток. Однако степень уменьшения максимального стока при увеличении лесистости водосборов неодинакова. Наиболее резко он снижается при возрастании лесистости до 30—40 %, менее интенсивно в интервале лесистости от 30—40 до 60—70 % и в относительно небольших пределах — при лесистости выше 70 %. Это достаточно четко прослеживается по градиенту изменения стока на 1 % лесистости, который в пределах анализируемого ряда водосборов имеет следующий характер. При лесистости водосборов 12—35 % он в среднем составляет 14,8 л/(с · км<sup>2</sup>), при лесистости 35—65 % — 4,8 и при большей лесистости — всего 2,3 л/(с · км<sup>2</sup>).

В целом стокорегулирующее влияние леса будет максимальным при сплошном облесении речных бассейнов. Но в связи со значительной хозяйственной освоенностью Карпат редко бассейны имеют такую

лесистость или возможность ее достижения. В этом отношении за вполне удовлетворительный нижний предел лесистости можно принять 65 %, при котором паводковая составляющая становится относительно стабильной. По сравнению с безлесными водосборами на бассейнах, лесистость которых превышает 65 %, минимальные модули стока возрастают в среднем в 8 раз, максимальные снижаются в 6 и общая зарегулированность стока возрастает более чем в 1,6 раза.

Для анализа влияния леса на водность рек использовались данные о годовом стоке рек и морфометрических характеристиках водосборов. Последние заимствованы из гидрологических ежегодников и справочников, а данные по средневзвешенным осадкам — из работ М. И. Кирилюка [1976, 1985], Н. Г. Галущенко [1977] и материалов Закарпатской воднобалансовой станции. Расчетный период принят с 1960 по 1970 г. Он состоял из двух одинаковых по продолжительности фаз стока: 1960—1964 гг. были маловодными, а 1965—1970 гг. — многоводными. Лесистость водосборов определена по материалам лесоустройства и учета лесного фонда.

Корреляционный анализ показал, что для совокупности водосборов достоверная связь имеется между осадками и стоком. Коэффициент парной корреляции между ними составляет  $0,68 \pm 0,09$ . Связь между другими факторами и стоком выражена слабо: коэффициенты парной корреляции стока с высотой, площадью и лесистостью водосборов составляют соответственно 0,19; 0,37 и 0,36. Таким образом, на фоне большого разнообразия природных условий Карпат четкая связь стока выражена только с атмосферным увлажнением.

Для Карпат сравнительно тесные связи стока с высотой и лесистостью водосборов выражены в пределах отдельных физико-географических областей. Так, во Внешних Карпатах (13 водосборов с площадями 18—733 км<sup>2</sup>, высотами 610—1200 м, лесистостью 40—87 %, осадками 1018—1475 мм) коэффициенты парной корреляции между стоком рек и этими характеристиками водосборов составляют соответственно  $0,72 \pm 0,13$  и  $0,78 \pm 0,11$ . Для Водораздельно-Верховинских Карпат (16 водосборов с площадями 2—165 км<sup>2</sup>, высотами 690—1000 м, лесистостью 20—97 %, осадками 1043—1219 мм) они равны  $0,50 \pm 0,18$  и  $0,60 \pm 0,12$ . В этих областях сток почти не связан с площадью водосборов (коэффициенты корреляции —0,28 и —0,30).

Судя по данным корреляционного анализа, водность горных рек кроме атмосферного увлажнения и высоты местности зависит от лесистости водосборов. Однако наличие сравнительно тесных положительных связей между стоком и лесистостью нельзя принимать в качестве единственного достоверного критерия водоохранной роли горных лесов, поскольку распределение лесистости находится в определенной связи с осадками и высотой. Так, коэффициенты корреляции лесистости с осадками и высотой для водосборов Внешних Карпат составляют  $0,80 \pm 0,10$  и  $0,72 \pm 0,13$ , а для водосборов Водораздельно-Верховинских Карпат равны  $0,68 \pm 0,14$  и  $0,72 \pm 0,12$ . Кроме этого, в каждой из областей осадки связаны с высотой (коэф-

Таблица 2.13

Зависимость годового стока рек Карпат от различных характеристик водосборов

Река — пункт	Средняя высота водо-сбора над ур. м., м	Площадь водо-сбора, км <sup>2</sup>	Уклон реки, %/oo	Лесистость, %	Осадки, мм	Слой стока, мм
Чечва — Спас	820	269	12,6	71	1200	580
Орава — Святослав	830	204	15,2	77	1210	601
Лужанка — Гошев	660	146	26,7	59	1052	473
Сукаль — Тисов	770	138	26,0	79	1140	630
Прут — Яремча	990	597	21,8	71	1296	587
Быстрица Надворнянская — Пасечна	1000	484	19,5	79	1315	625
Свича — Мысловна	1000	201	23,9	87	1315	797
Путила — Путила	960	181	24,2	50	1000	383
Серет — Лопушна	910	152	26,0	83	970	394
Голятинка — Голятин	780	59	31,4	32	1132	741
Голятинка — Майдан	780	86	23,4	43	1111	730
Рика — Верх. Быстрый	880	165	40,0	69	1166	770
Студеный — Верх. Студеный	809	8,0	56,6	20	1043	678
Грабовец — Межгорье	788	10,2	74,1	92	1137	787
Бранице — Лопушное	916	10,3	66,6	67	1214	582
Лопушна — Лопушное (верх.)	897	37,3	63,2	78	1166	689
Лопушна — с. Лопушное (ниж.)	925	13,2	96,3	88	1203	802

фициенты корреляции равны  $0,97 \pm 0,02$  и  $0,65 \pm 0,14$ . Из этого следует, что в пределах природных областей осадки, сток и лесистость подчинены закономерностям вертикальной поясности физико-географических условий.

В Карпатах относительно «чистое» влияние леса на водность рек проявляется при сопоставлении годового стока с водосборами, расположенных в сходных почвенно-климатических и геоморфологических условиях, имеющих примерно одинаковые площади и уклоны рек, но различающиеся лесистостью. В табл. 2.13 приведены показатели стока с бассейнов, различия в лесистости которых — 6—72 %. Данные свидетельствуют, что с увеличением лесистости водосборов возрастает слой и коэффициент годового стока. Вместе с тем изменение стока с лесистостью не идентично для всех подобранных групп и пар водосборов. Это, очевидно, объясняется неодинаковыми физико-географическими условиями горной территории, учесть которые весьма трудно. Кроме этого, на показателях стока могут сказываться возраст и состав насаждений, а также хозяйственная деятельность в лесах, по-разному влияющие на водный режим горных склонов [Дьяков, 1976; Чубатый, Олийник, 1976; Олийник и др., 1986].

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют об увеличении водности горных рек под влиянием лесистости водосборов. Однако на фоне подавляющего влияния метеорологических и ряда других природных факторов формирования стока эта роль лесов четко не выражена, что затрудняет ее количественную оценку.

## 2.4. ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ПОЛОВОДЬЯ РЕК ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ

Факторы подстилающей поверхности — лес, болота, наличие на водосборе озер, водохранилищ и карста — относятся к той группе параметров, которые оказывают существенное влияние на процесс формирования и объем максимального стока половодья. В расчетных формулах их учет чаще всего производится посредством введения в конечный результат одного или нескольких поправочных коэффициентов. Такой подход, давая в большинстве случаев вполне удовлетворительные результаты, тем не менее не объясняет природу воздействия факторов подстилающей поверхности на различных этапах формирования талого стока.

С методической стороны более правильным следует считать разделение совокупности факторов на две категории — склоновые и русловые. К первым можно отнести залесенность, заболоченность, наличие на водосборе легко проницаемых пород, карста. Их влияние на максимальный сток осуществляется через элементы гидрографов склонового стекания, главным образом через продолжительность притока  $T_0$  и общий слой притока  $h_{ск}$ . Озера руслового типа, пруды и водохранилища, относясь ко второй категории факторов, благодаря наличию регулирующих емкостей оказывают непосредственное трансформирующее влияние на максимальную ординату руслового гидрографа.

Объективное существование в природе факторов регулирования стока на склонах и непосредственно в русловой сети требует соответствующего отражения в расчетных формулах максимального стока. Раздельный учет факторов склонового и руслового стока позволяет более правильно построить структуру формул, а также оценить направление и размеры влияния отдельных факторов, что весьма важно при управлении водными ресурсами. Нами исследована роль основных факторов подстилающей поверхности на максимальные слои стока весеннего половодья рек Западно-Сибирской равнины.

Западно-Сибирская равнина — открытая к северу территория со слегка приподнятыми краями, занимающая площадь более 2,5 млн км<sup>2</sup>, представляет собой территорию с ясно выраженной широтной зональностью климата, почв, растительности. Четко выраженная зональность в распределении тепла и влаги в сочетании с равнинностью территории, в свою очередь, предопределяет и широтный характер изменения основных характеристик гидрологического режима водных объектов.

Принимая во внимание обширность территории, на первом этапе проведено ее районирование по степени однородности распределения снегозапасов с использованием критерия Стьюдента. Применению этого критерия предшествовала проверка всех наблюденных рядов снегозапасов на нормальность и однородность среднеквадратических отклонений по критерию Фишера.

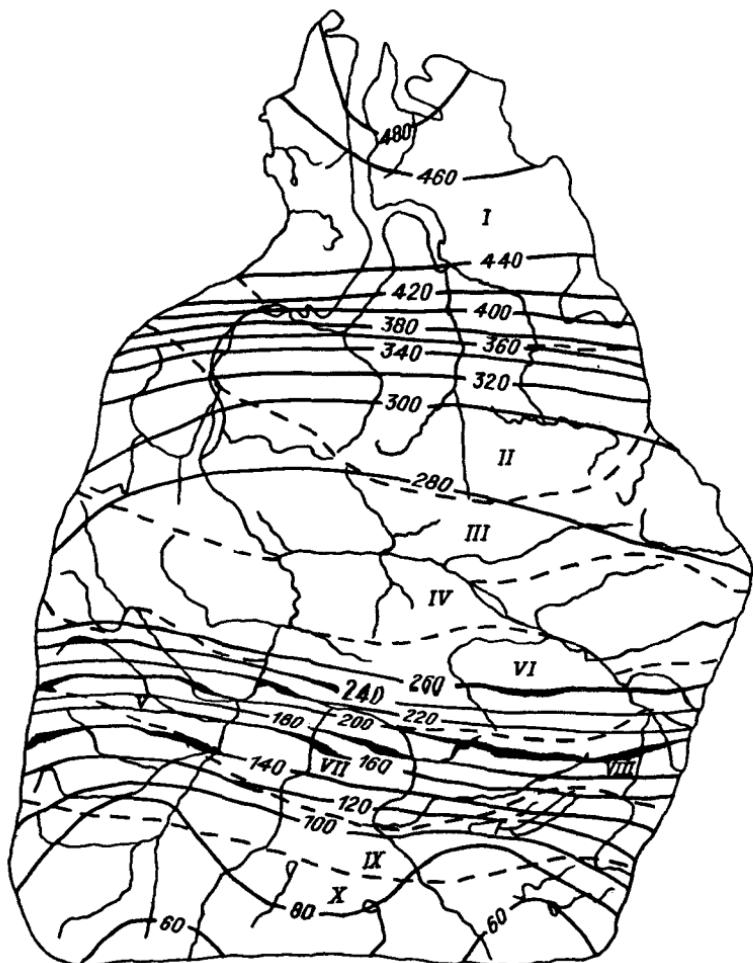


Рис. 2.5. Картосхема расчетных слоев стока (в мм) весеннего половодья рек Западно-Сибирской равнины. Штриховой линией показаны границы гидрологических районов (I ... X).

Анализ данных 247 метеорологических станций, сравнительно равномерно освещивающих рассматриваемую территорию, позволил выделить 10 районов, однородных по значениям средних показателей снегозапасов (рис. 2.5). Границы выделенных районов проведены по водоразделам рек.

Оценка влияния факторов склонового регулирования на сток половодья проводилась на основе анализа зависимостей расчетных слоев стока  $h_c'$  от озерности, заболоченности и лесистости водосборов. При этом принималось во внимание также и то, что слои стока в определенной мере могут зависеть от высоты, площади и уклона водосборов, распаханности его территории.

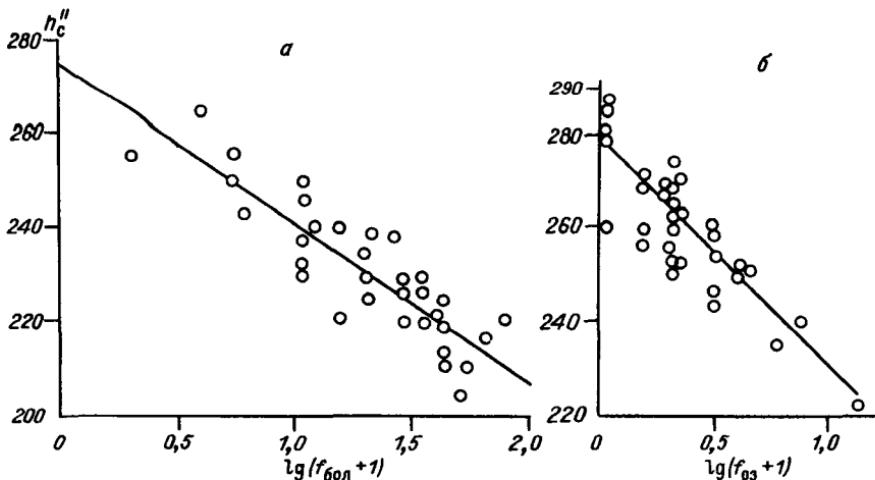


Рис. 2.6. Зависимость расчетных слоев стока весеннего половодья  $h_c''$  от заболоченности (а) и озерности (б) водосборов.

Учитывая несоответствие статистических параметров  $Q_{\max}$  и  $h_{\max}$ , в настоящем исследовании в качестве расчетных, согласно рекомендациям Е. Д. Гопченко [1976], использованы не равнообеспеченные, а сопряженные с максимальными расходами 1 %-й вероятности превышения слои стока.

В общем виде зависимости имеют редукционный характер и аналитически для учета влияния озер могут быть аппроксимированы уравнением вида  $h_c'' = h_{c_1}' - n \lg (f_{o_3} + 1)$ ; для учета влияния болот — вида  $h_c'' = h_{c_2}' - m \lg (f_6 + 1)$ , где  $h_{c_1}'$  и  $h_{c_2}'$  — слои стока половодья при нулевой озерности и заболоченности водосборов, мм;  $n$  и  $m$  — тангенсы углов наклона линий связи к оси абсцисс;  $f_{o_3}$  и  $f_6$  — озерность и заболоченность водосборов, %.

Коэффициенты, учитывающие степень влияния озер на слои стока половодья, рассчитывались по выражению  $\frac{n}{h_{c_1}'} = \alpha_{o_3} = \frac{1 - h_c''/h_{c_1}'}{\lg (f_{o_3} + 1)}$ .

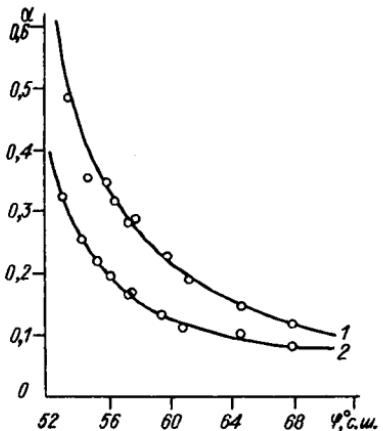
Оценка влияния заболоченности проводилась по аналогичной схеме, но в расчет вводились слои стока, откорректированные на предшествующем этапе, причем  $h_c' = \frac{h_c}{1 - \alpha_{o_3} \lg (f_{o_3} + 1)}$ . В качестве примера на рис. 2.6 приведены зависимости расчетного слоя весеннего стока от озерности и заболоченности для четвертого района.

После установления для каждого из районов расчетных значений параметров  $\alpha_{o_3}$  и  $\alpha_6$  осуществлена их увязка с широтой местности  $\phi$  (рис. 2.7). В расчетах использованы данные по 151 пункту наблюдений.

Параметры  $\alpha_{o_3}$  и  $\alpha_6$  отражают степень влияния озерно-болотных ландшафтов на максимальные слои талого стока. Их уменьшение с юга на север объясняется снижением суммы потерь на испарение за период половодья. Причем в том же направлении наблюдается

Рис. 2. 7. Зависимость параметров  $\alpha$  от широты местности  $\phi$ .

1 — для озерности; 2 — для заболоченности.



на поверхности болот могут быть даже несколько больше, чем с озер. С продвижением на юг эти различия все больше возрастают, достигая максимума на юге — в зоне недостаточного увлажнения. Этому факту способствует также и то, что на территории Западно-Сибирской равнины наибольшее распространение получили небольшие (менее 1 га) озера бассейнового типа, которые в весенний период, прогреваясь значительно быстрее болотного массива, расходуют большие объемы талых вод на испарение.

Полученные результаты подтверждаются исследованиями ряда авторов. В работе О. И. Крестовского и Н. П. Хатькова [1980] показано, что в весенний период для лесной зоны ЕТС испарение с болотных ландшафтов в среднем на 15—20 % больше, чем с поля.

Западно-Сибирская равнина изобилует озерами. Причем преобладающее большинство из более чем 800 тыс. озер внутриболотные, они занимают значительные площади заболоченных территорий и являются неотъемлемым элементом ландшафтов Западно-Сибирской равнины. Часто данные озера рассматриваются как бессточные. Однако в условиях избыточного увлажнения Западной Сибири все озера имеют сток. В период весеннего снеготаяния связь между озерами и речной системой осуществляется по сети проток и внутриболотных ручьев, а при их отсутствии — только фильтрационным путем через торфяную залежь и в основном через ее деятельный горизонт [Болота..., 1976]. Внутриболотные озера Западно-Сибирской равнины частично задерживают весенние воды, из которых лишь незначительная часть поступает в русловую сеть, остальная же расходуется на испарение и транспирацию с поверхности озер или аккумулируется в торфиной залежи окружающих болотных массивов с последующим расходованием также на испарение. По данным К. Е. Иванова и С. М. Новикова [Болота..., 1976], испарение с внутриболотных озер составляет более 70 % их водного баланса, причем потери на испарение с поверхности озер лесной зоны Западной Сибири в зависимости от их размера превышают потери на испарение с болот на 15—40 % [Качалова, 1977].

и уменьшение соотношения  $\alpha_{03}/\alpha_0$  от 1,85 (южная часть бассейна р. Тобол, Барабинские и Кулундинские степи) до 1,35 (тундровая и лесотундровая зоны).

В условиях низких температур и избыточного увлажнения севера исследуемой территории потери на испарение зависят только от суммарного притока тепла. В этих условиях нет существенной разницы между испарением с поверхности озер и болот, а в отдельные периоды года потери на испарение с по-

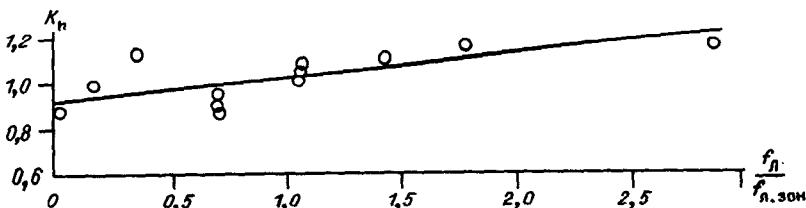


Рис. 2. 8. Зависимость поправочного коэффициента к стоку половодья  $K_h$  от коэффициента «азональности» для степной зоны Западно-Сибирской равнины.

Вопрос о влиянии леса на весенний сток не менее важный. Являясь одним из основных факторов формирования склонового стока, лес может оказывать существенное влияние на максимальные расходы воды. Коэффициенты, учитывающие уменьшение максимальных расходов половодья при возрастании лесистости, были разработаны рядом исследователей [Алексеев, 1955; Мокляк, 1959; Соколовский, 1959; и др.].

Влияние леса как части географического ландшафта на объемы весеннего половодья неоднозначно. Некоторыми авторами [Водогрецкий, Зайцева, 1978] отмечается, что даже в пределах одной и той же природной зоны или одного и того же лесного сообщества можно наблюдать на одних водосборах положительное влияние леса, а на других — отрицательное.

Для учета влияния степени залесенности на максимальные слои стока половодья использована методика, предложенная Т. Н. Чижмаковой [1979]. Анализ влияния залесенности выполнялся в пределах выделенных районов (см. рис. 2.5). В расчет вводились слои весеннего стока, для которых, согласно Е. Д. Гопченко [1976], исключено влияние озер и болот.

По всем водосборам вычислены коэффициенты «азональности», представляющие собой отношение лесистости данного бассейна ( $f_{л. %}$ ), к зональной (средней для данного района) залесенности ( $f_{л. з. %}$ ), а также поправочные коэффициенты к значениям стока половодья ( $K_h = h_c / h_{c. з.}$ ), полученные как отношение расчетного слоя стока за половодье к зональному стоку, определенному по карте изолиний (см. рис. 2.5).

Распределение расчетного слоя стока по территории в общих чертах носит зональный характер, отражая изменения осадков за зимний и весенний периоды, рельефа и других физико-географических особенностей местности. Строгая широтная зональность нарушается горами и возвышеностями. Восточные склоны Уральских гор и их предгорья относятся к области повышенного стока, поэтому изолинии здесь вытянуты с юго-запада на северо-восток.

На графике зависимости  $K_h$  от коэффициента «азональности», построенного для некоторых районов исследуемой территории (рис. 2.8), влияние леса на максимальные слои стока весеннего половодья обнаруживается только для самого южного района (10), расположенного в степной зоне Западно-Сибирской равнины.

Таблица 2.14

## Характеристики запасов воды в снежном покрове

Станция	Вы- сота над ур. м. м	Норма сне- гозапасов, мм		Коэф- фици- ент снего- запа- сов	Станция	Вы- сота над ур. м. м	Норма сне- гозапасов, мм		Коэф- фици- ент снего- запа- сов
		Поле	Лес				Поле	Лес	
Здвинск	112	69,6	145	2,08	Овечкино	160	85,6	157	1,83
Ордынское	117	74,8	135	1,81	Рожнев Лог	220	47,8	100	2,09
Ребриха	214	85,7	143	1,67	Усть-Волчиха	190	55,6	111	2,00
Исиль-Куль	127	59,0	90	1,52	Старогорносталево	110	48,2	155	3,22
Шумиха	175	72,4	142	1,96					

Поправочные коэффициенты, учитывающие степень влияния залесенности водосбора (на фоне зональных величин) на максимальный слой весеннего стока, снятого с карты, имеют следующие значения:

$K_d = f_d / f_{d,3}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Поправочный коэффициент	0,92	0,96	1.0	1,07	1,13	1,18	2,03

Величина  $f_{d,3}$  в пределах района 10 принята равной 14 %.

Вопрос о влиянии леса на сток весеннего половодья необходимо рассматривать через соотношение составляющих водного баланса — осадков и суммарного испарения.

По данным А. В. Лебедева [1964] и В. В. Рахманова [1956], коэффициент снегозапасов, выражющий отношение запасов воды, содержащихся в снежном покрове в лесу, к запасам воды в снежном покрове поля, составляет в лиственных лесах 1,22—1,24, в хвойных — 1,12. Для лесостепной и степной зон Западно-Сибирской равнины эти коэффициенты равны соответственно 1,68 и 2,46 [Лебедев, 1964].

Испарение с лесных массивов в весенний период в условиях исследуемой территории не превышает испарения с открытых участков, а для некоторых типов леса оно даже меньше [Федоров, 1967; Чижмакова, 1973].

Некоторое увеличение снегозапасов в лесу по сравнению с их величинами в поле, компенсируется за счет больших потерь на инфильтрацию в период половодья [Чижмакова, 1973; Крестовский, Соколова, 1980]. Лесные почвы, обладая высокой впитывающей способностью, переводят часть талого поверхностного стока в подповерхностный, тем самым способствуя увеличению продолжительности притока  $T_0$ . Поглощенная почвой талая вода в период формирования весеннего половодья, особенно в районах с засушливым климатом, не полностью поступает в русловую сеть, а частично расходуется на испарение.

Зависимость слоя стока от залесенности, полученная для района 10 исследуемой территории (см. рис. 2.8), по-видимому, объясняется резким увеличением коэффициента снегозапасов в степной зоне по сравнению с лесостепной зоной Западно-Сибирской равнины (табл. 2.14), в то время как потери на инфильтрацию за период

половодья не увеличиваются в той же мере, что и приводят к росту максимальных объемов весеннего стока с ростом залесенности водосбора.

А. А. Соколов [1961], А. В. Лебедев [1964], исследуя влияние леса на слои весеннего стока в бассейне р. Оби, пришли к аналогичному выводу. Они утверждают, что лес, увеличивая осадки и уменьшая коэффициент испарения, повышает и объем весеннего стока. Доля подземной составляющей весеннего стока на лесных реках больше, чем на безлесных.

## 2.5. ИНДИКАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛЕСНОГО ПОКРОВА В РАСЧЕТАХ ПОДЗЕМНОГО ПИТАНИЯ ВОДОТОКОВ

В настоящее время в практике изучения природных явлений широкое развитие получили индикационные геоботанические исследования. Б. В. Виноградов [1964] отмечает: «Растительными индикаторами могут служить как отдельные растения и фитоценозы, так и особенности строения и состава растений, которые в силу их тесной связи с различными элементами ландшафта указывают на характер, распределение и динамику условий окружающей среды» (с. 8).

Применение растительных индикаторов в процессе познания природных явлений связано с рядом их специфических особенностей. Во-первых, пространственность наблюдений. Оценка распространения элементов ландшафта, скрытых от непосредственного наблюдения, производится на основе их изучения в отдельных точках. Пространственное распределение этих элементов определяется методом интерполяции между отдельными точками наблюдений. Растительные индикаторы позволяют заменить интерполяцию непосредственным прослеживанием границ между объектами картографирования по границам индикационных признаков. Во-вторых, возможность непосредственных визуальных наблюдений за растительным покровом. Многие элементы ландшафта (горные породы, грунтовые воды и т. д.) большей частью нельзя наблюдать непосредственно. Растительные индикаторы позволяют обнаружить скрытые их свойства, с которыми растительность связана прямо или косвенно, так как растительность физиономична, легко доступна визуальному наблюдению и непосредственно отображается на картах и аэрофотоснимках.

На перспективность использования признаков «из области почв и растительного покрова» для индикации общих климатических и гидрологических особенностей района указывал В. Г. Глушков [1961]. В наших исследованиях рассмотрены возможности применения растительных индикаторов при оценке подземного питания водотоков лесоболотной зоны Западно-Сибирской равнины.

В ряде работ — Н. К. Минина и др. [1968], Ю. Н. Куликова [1970], В. А. Земцова [1978] — указывается, что надежной интегральной характеристикой подземного питания рек является относительная площадь дренированных ландшафтов. Основой этого вывода служат, во-первых, исследования К. Е. Иванова [1957] и В. В. Романова [1961], из которых следует, что с верховых болот

сток осуществляется в пределах деятельного слоя. Во-вторых, Ю. Н. Куликовым [1970] установлено, что в развитых болотных системах Васюганья «подавляющее количество атмосферных осадков стекает по внутриболотной гидрографической сети к истокам рек, и лишь незначительные объемы, получаемые с окраинной части болот, могут выклиниваться на минеральные „берега“ и питать подземные воды, хотя и здесь, как показало изучение аэроснимков, сток происходит сосредоточенно по времененным руслам, спорадически питающим основные реки» (с. 64).

Пополнение запасов грунтовых вод, питающих реки, происходит главным образом на дренированной части водосборов, где почвы обладают сравнительно высокой инфильтрационной способностью. Отсюда следует, что чем больше площадь дренируемой части водосбора, тем большая разгрузка подземных вод.

Ю. Н. Куликовым [1970] проведено изучение связей подземного притока в реки с площадью дренируемой части бассейнов для территории центральной и восточной частей Васюганья. Исследованы водосборы, характеризующиеся существенным сходством рельефа, почвенно-растительного покрова, состава четвертичного горизонта (как горизонта активного водообмена) и различием в степени верхового (олиготрофного) заболачивания. Была выявлена тесная линейная связь между слоем подземного стока  $U$  и долей дренируемой части водосборов  $f_c/F$  ( $f_c$  — площадь суходолов,  $F$  — общая площадь бассейна реки) для 14 водосборов рассматриваемой территории. Зависимость  $U = f_c(f_c/F)$  рекомендована для оценки слоя подземного стока в условиях Васюганья.

Нами рассмотрены взаимосвязи между расходом подземного стока в реку-дрену  $\bar{Q}_n$  и площадью дренируемой части водосборов  $f_n$  для 106 рек лесоболотной зоны Западно-Сибирской равнины. Данные о  $\bar{Q}_n$  получены из отчетных материалов ГГИ, о  $f_n$  — из справочников «Основные гидрологические характеристики» [1978, 1979]. Ошибка определения среднемноголетней величины подземного притока в реки не превышает 15 %.

Анализ зависимости  $\bar{Q}_n = f(f_n)$  проводился с учетом морфоструктурного плана исследуемого района, согласно схеме морфоструктурного районирования, предложенной М. Е. Городецкой, Ю. А. Мещеряковым [1970].

Морфоструктурами, по И. П. Герасимову [1959], «являются геологические структуры, которые находят отражение в современном рельефе и имеют тесную генетическую связь с последним. Они возникают под ведущим влиянием эндогенных сил — тектонических движений — в ходе исторически развивающегося противоречивого взаимодействия эндогенных процессов с разнообразными экзогенными явлениями» (с. 8). М. С. Карасев, Г. И. Худяков [1984] считают, что гидрогеологические структуры организованы «конструктивными — положительными (области питания вод) и деструктивными — отрицательными (области разгрузки и аккумуляции вод) морфоструктурами» (с. 5). Таким образом, морфоструктуры следует рассматривать в качестве показателя условий формирования стока, в котором

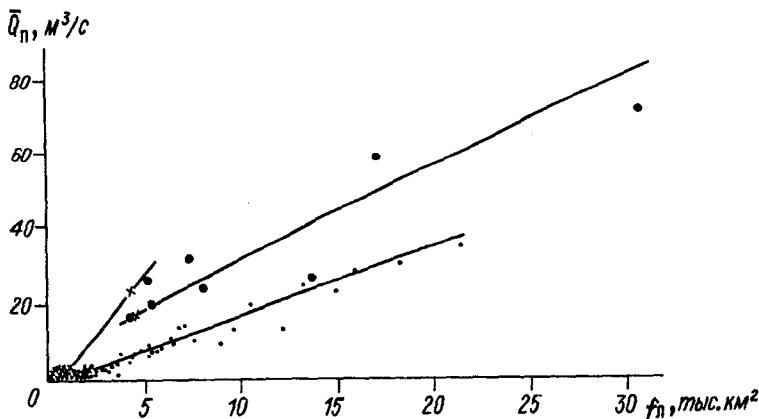


Рис. 2. 9. Зависимость подземного притока в реки  $Q_n$  от площади дренированных территорий  $f_n$ .

косвенно находят отражение геологические, геоморфологические и гидрологические особенности строения речных бассейнов.

Зависимости  $U_n = f(f_c/F)$  получены Ю. Н. Куликовым [1970] для рек, расположенных в пределах морфоструктуры одного типа Васюганско-Бакчарской возвышенности. В данной работе установлены тесные зависимости между  $Q_n$  и  $f_n$  водотоков, расположенных в пределах положительных (72 реки, первый тип) и отрицательных (18 рек, второй тип) морфоструктур, а также находящихся в переходной зоне между морфоструктурными элементами (8 рек, третий тип) (рис. 2.9). Взаимосвязи имеют линейный вид.

Как отмечают Н. К. Минин и др. [1968], в материалах Госкомгидромета к лесам отнесены и заболоченные типы местности. Поэтому при изучении взаимосвязей  $Q_n = f(f_n)$  не рассматривались речные бассейны, большая часть территории которых является заболоченной, так как значения  $f_n$  для таких водосборов завышены. Нами проведено сравнение лесистости по справочникам «Основные...» [1978, 1979] и по карте «Растительность Западно-Сибирской равнины» [1976] (табл. 2.15). При выделении сухих, заболоченных лесов и болот по названной карте использовались приемы типизации экологических групп растительных сообществ, предложенные И. Ф. Гелетой и др. [1978]. При нанесении створа поста на карту учитывались рекомендации Н. И. Волкова [1950]. Точность проведения водораздельных линий контролировалась по соотношению площадей левобережной и правобережной частей водосборов, полученных с крупномасштабных топографических карт. Как следует из табл. 2.15, расхождения в значениях лесистости водосборов по справочникам довольно существенны.

Показанные на рис. 2.9 зависимости подземного притока в реку от дренированности водосборов аппроксимировались следующими уравнениями:

для рек первого типа  $Q_n = 0,002f_n - 0,577$ ,  $R = 0,98 \pm 0,01$ ;

Таблица 2.15

## Лесистость по данным разных источников, %

Река — пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Справочник «Основные...» [1978, 1979]	Карта «Растительность...» [1976]
Конда — Чантырья	13900	65	15
Конда — Урай	23400	60	15
Конда — Междуреченский	41200	55	25
Тром — Юган — Кочевые	5860	10	15
Тром — Юган — Русскинские	8800	35	10
Тром — Юган — Ермаково	13500	30	10
Аган — Аган	29700	40	25
Лямин — Горшково	12800	20	5

для рек второго типа  $\bar{Q}_n = 0,004f_n - 1,11$ ,  $R = 0,88 \pm 0,08$ ;

для рек третьего типа  $\bar{Q}_n = 0,002f_n + 11,14$ ,  $R = 0,92 \pm 0,7$ .

Доля вклада нелинейной составляющей в дисперсию по  $X$  для рек всех типов составила менее 0,001, в дисперсию по  $Y$  — для водотоков первого, второго и третьего типов — соответственно 0,003; 0,02; 0,01.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать выводы, что в лесоболотной зоне Западно-Сибирской равнины существуют тесные линейные связи между подземным притоком в реки и площадями дренированных ландшафтов. Морфоструктура во многом предопределяет характер взаимосвязей  $Q_n$  и  $f_n$ .

## 2.6. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОСИСТЕМ БАССЕЙНА р. СЕЛЕНГИ

При расчетах речного стока часто исходят из гипотезы о его обусловленности комплексом бассейновых природных характеристик, в частности средних высот и площадей водосборов, густоты речной сети, залесенности и т. д. В рамках простых регрессионных моделей анализируются региональные связи, которые с определенной степенью достоверности распространяются на неизученные территории. Схемы гидрологического районирования в большинстве случаев субъективны и зависят от исходного набора классификационных признаков (или одного признака). При этом предполагается, что речной бассейн, как элементарная ячейка формирования стока, является однородным образованием. В то же время более обосновано применение моделей с рассредоточенными параметрами, в основу которых положены данные о сочетании почвенно-растительных и других природных условий. Представляется, что искать новые принципы гидрологического районирования нецелесообразно. Достаточно осмысльить геосистемную иерархическую классификацию, использующую системный анализ, и дать ей гидрологическую интерпретацию. При этом речной бассейн представляется набором элементарных однородных ячеек стокообразования, а следовательно, гидрологические районы по сути — геосистемы разного уровня и типа. Различные бассейны могут являться сочетанием ландшафтов,

а интегральный речной сток — достаточно сложной суперпозицией элементарных стоков с их территории.

Проблема использования ландшафтных принципов изучения стока постоянно дискутируется в гидрологии, но до последнего времени конструктивных решений принято немного. Так, в работе А. И. Субботина [1978] решаются в основном задачи учета стока на границах ландшафтов и получения суммарного стока и водно-балансовых характеристик всего водосбора как алгебраической суммы с весами, пропорциональными площадям ландшафтов. Хорошая сходимость результатов подтверждает приемлемость линейной модели водосбора.

Ландшафт — одно из основных звеньев механизма бассейнового регулирования речного стока. Особенна важна роль ландшафтов в формировании генетически разнородных составляющих водных ресурсов. В то же время очевидно, что сток за характерные его фазы (зимняя и летняя межень, половодье и паводки) зависит от внутрьландшафтного перераспределения влаги, что связано с аккумулирующей способностью подземных резервуаров. За гидрологический год происходит значительная интеграция стокоперераспределяющих факторов, и на передний план выходят процессы, управляющие структурой водного баланса речного бассейна.

Факторы речного стока нельзя отнести к элементарным физическим процессам, которые легко параметризуются. В статистическом смысле — это информативные и аддитивные функции с четкой направленностью развития. Поэтому часто выявляются не факторы, а их физиономические свойства. В этом смысле ландшафты можно считать индикаторами речного стока. Информация о них содержится в ряде карт различного содержания.

На карте «Ландшафты юга Восточной Сибири» [1976] выделяется более 200 групп фаций, объединяемых в ландшафты. Площади, занятые ландшафтами в пределах речных бассейнов, в замыкающих створах которых измеряется сток, являются предикторами модели.

Система линейных уравнений следующая: 
$$Q_j = \sum_{i=1}^n M_i f_{ij},$$

где  $Q_j$  — сток с  $j$ -го речного бассейна, л/с;  $M_i$  — модуль стока с  $i$ -го ландшафта, л/(с·км<sup>2</sup>);  $f_{ij}$  — площадь  $i$ -го ландшафта в  $j$ -м бассейне, км<sup>2</sup>. Модель является аддитивной, а совместность уравнений для различных бассейнов определяется принадлежностью последних к одной физико-географической области.

В качестве алгоритма вычисления набора коэффициентов систем линейных уравнений выбрано сингулярное разложение, дающее более устойчивое решение [Форсайт, 1980]. В результате получены модули (слои стока) с территорий основных ландшафтов бассейна р. Селенги.

Гипотезы, позволяющие обосновать реальность результатов, следующие:

— ландшафт — однородная по условиям формирования стока

Таблица 2.16

## Сезонное распределение стока с основных ландшафтов бассейна р. Селенги

Гидрологическая фаза	Тип ландшафтов															
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
1	249	304	462	—47	75	324	—104	204	—103	—440	485	537	687	—35	404	—75
2	223	268	345	—42	40	287	—75	186	—147	—429	467	443	707	—23	278	—72
3	45	48	136	1	43	40	—32	21	—2	14	10	107	—29	—3	101	0
4	21	21	74	1	25	0	—6	—2	0	23	—8	42	—35	—3	31	3
5	39	—8	102	—20	40	49	—33	—32	0	—21	2	95	35,7	17	103	—22
6	94	51	44	—26	52	114	—65	51	—26	—39	—3	138	54,9	39	136	19
7	43	52	43	—8	2	71	—9	42	—49	—88	109	17	132	4	42	8
8	118	135	196	—16	33	143	—4	88	—80	—147	212	102	223	25	119	26
9	2,5	5,0	3,6	—1,0	2,7	21,4	—11,3	5,6	—14,7	—13,7	14,8	3,5	29,9	—2,1	24,4	1,4
10	0,6	2,3	7,5	—0,2	2,2	12,0	—7,8	2,9	—7,8	—2,2	3,0	7,3	11,7	—0,6	19,4	—0,5
11	1,6	1,7	5,4	0,0	1,6	—0,3	0,2	—0,2	0	1,5	0,0	1,9	—2,3	—0,2	2,1	0,8
12	1,2	1,1	3,4	0,1	1,0	0,1	0,1	—0,3	—0,1	1,0	0,0	1,5	—2,3	—1,9	1,9	0,9

П р и м е ч а н и е. Характеристики ландшафтов согласно нумерации приведены в тексте. Гидрологические фазы: 1 — год; 2 — весенне-летний период; 3 — осенне-зимний период; 4 — зимний сезон; 5 — половодье 50 %-й обеспеченности; 6 — половодье 5 %-й обеспеченности; 7 — паводок 50 %-й обеспеченности; 8 — паводок 5 %-й обеспеченности; 9 — модуль стока летний, 30-дневный; 10 — модуль стока летний суточный; 11 — модуль стока зимний, 30-дневный; 12 — модуль стока суточный зимний. Сток за гидрологические фазы 1—8 в мм, а 9—12 в л/(с · км<sup>2</sup>).

территория, характеризующаяся единым стокоперераспределяющим механизмом;

— водообмен между ландшафтами происходит лишь во время гидрологических фаз годового цикла, когда преобладает склоновый сток. В другие периоды вода поступает непосредственно в русловую сеть, дренирующую данный ландшафт;

— условия склонового стекания (макро- и микрорельеф) определяют условия восполнения запасов подземных вод, т. е. сочетание фаз дренирования и аккумуляции влаги в пределах ландшафта;

— ландшафт является индикатором тепло- и влагообеспеченности той части водосборного бассейна, которая им занята и характеризуется специфической структурой водного бассейна и устойчивым соотношением показателей водоотдачи за фазы водного режима.

При этом считается, что сток — интегральная характеристика, а модель водосбора на основе использования информации об однородных ячейках стокоформирования позволяет дифференцировать механизм его формирования, выявить ведущие в этом отношении ландшафты и найти аппарат управления и регулирования стока во внутригодовом разрезе.

В результате расчетов для 16 ландшафтов оценен сток за основные гидрологические фазы. Генетические различия этих геосистем определяют их водоохранную и водорегулирующую роль, выраженную в том, что в различные сезоны ландшафты аккумулируют влагу или дренируются реками (табл. 2.16).

Ниже приводится последовательное описание водоотдачи с территорий основных ландшафтов бассейна р. Селенги за характерные фазы их гидрологического режима.

I. Гольцовы альпинотипные и тундровые ландшафты включают в себя следующие фации: склоновые, скальные и обвально-насыпные с разреженным растительным покровом, поверхности выравнивания лишайниковые осоково-моховые, разреженные заросли кедрового стланика.

В течение года водоотдача с территорий, занятых гольцами, достигает 250 мм, основной сток формируется в весенне-летний период (220 мм). Осенне-зимний период однороден по условиям стокообразования. Суммарный сток за эту фазу достигает 45 мм, за зиму (XII—III) — 20 мм. За периоды половодья и паводков стекает примерно одинаковое количество воды — около 40 мм (слой стока 5%-й обеспеченности ( $h_{5\%}$ ) составляет 130—120 мм). Минимальный 30-дневный модуль стока за летний период 2,5, суточный — 0,6 л/( $с \times км^2$ ). Зимой сток ниже, но более равномерный:  $M_{30}=1,6$ ,  $M_{сут}=1,2$  л/( $с \times км^2$ ). Таким образом, гольцовы ландшафты имеют низкую водорегулирующую способность.

II. Подгольцовый лишайниковый ландшафт объединяет следующие фации, в пределах которых формируется сток: выровненных поверхностей и склонов с кедровым стлаником и ерником, пойм троговых долин с зарослями кустарников. Внутригодовое распределение стока идентично гольцовому ландшафту. Годовой слой стока превышает 300 мм, составляя в весенне-летний сезон 270 мм, 92

а в осенне-зимний 50 мм (зимой — 20 мм). В период весеннего половодья сток практически отсутствует. Слой стока за паводки составляет 50 мм ( $h_5\% \simeq 120$  мм). Минимальные месячные летний и зимний сток составляют соответственно 5,4 и 1,7 л/с·км<sup>2</sup>.

III. В подгольцовый лиственнично-редколесный тип ландшафта входят три фации: выровненных поверхностей и склоновых гравитационного сноса с редколесьями лиственницы; вершинных поверхностей и склонов редколесные из кедра и лиственницы. Годовой сток достигает 460 мм и по сезонам распределяется следующим образом: в весенне-летний 345 мм, осенне-зимний 136, зимний 74 мм. В половодье и паводок сток составляет соответственно 100 мм ( $h_5\% \simeq 44$  мм) и 45 мм ( $h_5\% \simeq 200$  мм). Минимальные летний сток 3,6, зимний — 5,4 л/с·км<sup>2</sup>.

IV. Горно-таежные лиственничные ландшафты включают две фации, на территории которых формируется сток: плоских поверхностей и пологих склонов редколесные со смешанным подлеском; склоновые редколесные лишайниковые. Годовой слой стока более 80 мм. За весенне-летний сезон слой стока составляет 40 мм, в осенне-зимний — 43, из них зимний сток — 25 мм. В половодье стекает 40 мм ( $h_5\% \simeq 50$  мм), а паводок практически не формируется. Минимальный сток летом 2,7 л/с·км<sup>2</sup>, а зимой 1,6 л/с·км<sup>2</sup>.

V. Горно-таежный лиственничный тип ландшафта представлен пологосклоновыми, склоновыми, плоских поверхностей со смешанным подлеском, кустарничково-мохово-луговыми с примесью кедра фациями. Годовой сток составляет 320 мм, на весенне-летний период приходится 290 мм, на осенне-зимний — около 40 мм, зимний сток отсутствует. В половодье наблюдается сток в 50 мм ( $h_5\% \simeq 110$  мм), в паводок — 70 мм ( $h_5\% \simeq 140$  мм). Минимальный летний сток очень высок и составляет 21,4 л/с·км<sup>2</sup>, а зимой происходит аккумуляция влаги ( $M_{30}=0,3$  л/с·км<sup>2</sup>), или около 7 мм).

VI. Горно-таежный лиственничный оптимального развития ландшафт представлен следующими фациями: плоские поверхности и склоны с кустарниковым подлеском; склоновые травяные с редким подлеском и остепненные, склоновые с сосновой и смешанным подлеском, с примесью сосны и разнотравные. Годовой сток с этого ландшафта составляет около 200 мм, из них на весенне-летний период приходится 186 мм и только 20 мм на осенне-зимний, в зимний сезон сток практически отсутствует. За половодье водоотдача достигает 30 мм ( $h_5\% \simeq 50$  мм), сток за паводок 40 мм ( $h_5\% \simeq 90$  мм). Модуль минимального месячного летнего стока достаточно высок — 5,6 л/с·км<sup>2</sup>.

VII. Межгорных понижений и долин таежный лиственничный ограниченного развития ландшафт представлен в бассейне пятью фациями: днищ котловин (подгорные) багульниковые с ерниковым подлеском: подгорных мохово- и травяно-кустарничковых ерников; долинные мохово-ерниковые; долинных ерников, долинных заболоченных лугов в сочетании с болотами и ерниками. В течение года они выступают как аккумуляторы влаги, задерживая ее во время

всех гидрологических фаз. За год в их пределах удерживается до 100 мм, в основном в весенне-летний период (75 мм). Лишь минимальный 30-дневный зимний сток имеет положительные значения (до 0,2 л/(с· км<sup>2</sup>)).

VIII. Подгорный и межгорных понижений лиственнично-таежный оптимального развития ландшафт составляют фации днищ котловин (подгорные) со смешанным подлеском; долинные травяные с кустарниковым подлеском и кустарничковых лугов; долинных лугов со злаковым, иногда остеиненным покровом; днищ котловин с кустарничковым подлеском; предгорных возвышенностей березово-лиственничные травяные с кустарничковым подлеском; подгорные болотно-луговые.

Годовой слой стока в балансе водосборов отрицательный, что свидетельствует об аккумуляции влаги (47 мм). В осенне-зимний период сток отсутствует. Потери стока за половодье в пределах ландшафта достигают 20 мм. Зимний минимальный сток практически отсутствует.

IX. Ландшафт подгорных и межгорных понижений лиственнично-таежный объединяет следующие фации: долинные и днищ котловин с кустарничковым подлеском, кустарничковых лугов и лугов со злаками, а также заболоченные; предгорных возвышенностей березово-лиственничные. По внутригодовому распределению стока подобны ландшафту межгорных понижений и долин таежно-лиственничных. Аккумуляция влаги происходит в весенне-летний период (147 мм), в то время, как зимой (XII—III) сток отсутствует.

X. Подгорный подтаежный лиственничный ландшафт представляют четыре фации: подгорные (равнин, террас и шлейфов) с примесью сосны травяные остеиненные; террас и шлейфов травяные с редким подлеском, местами остеиненные; подгорные луговых степей разнотравно-злаковые и разнотравные; днищ котловин с лиственницей и примесью сосны разнотравные. Ландшафт в годовом разрезе характеризуется отрицательным водным балансом, что, по-видимому, обусловлено развитием остеиненных территорий. В весенне-летний период в основном происходит аккумуляция влаги. В осенне-зимний период начинается водоотдача (14 мм), хотя осенью возможны потери стока, за зимние месяцы сток равен 23 мм. Модуль минимального зимнего стока достигает 1,5 л/(с· км<sup>2</sup>).

XI. Горно-таежный темнохвойный редуцированного развития ландшафт. В формировании стока участвуют две фации: пологосклоновые кедровые кустарничково-зеленошмовые и склоновые кедровые с лиственницей. Годовой сток с территории ландшафта равен 485 мм, преимущественно он формируется в весенне-летний сезон (470 мм); осенне-зимний сток — 10 мм, а зимой наблюдается незначительная аккумуляция (8 мм). Весенне половодье не формируется; за паводок сток достигает 110 мм ( $h_5 \approx 210$  мм), что не противоречит минимальным значениям летнего и зимнего стока (соответственно 14,8 и 0 л/(с· км<sup>2</sup>)).

XII. Горно-таежный темнохвойный ограниченного развития ландшафт, включающий следующие фации: плоских поверхностей и

склоновые с кедром и пихтой кустарничково-мелкотравно-зелено-мошные; склоновые кедровые с елью и лиственницей. Годовой сток составляет более 530 мм, из них большая часть (440 мм) приходится на весенне-летний период и 110 мм на осенне-зимний, в том числе 40 мм — на зимний сезон. В половодье сток более значителен — 95 мм ( $h_{5\%} \simeq 140$  мм), чем в паводок — 17 мм ( $h_{5\%} \simeq 100$  мм). Минимальный летний сток также высок и равен 3,5 л/( $\text{с} \cdot \text{км}^2$ ), минимальный зимний составляет 1,9 л/( $\text{с} \cdot \text{км}^2$ ).

XIII. Подгорные и межгорных понижений таежные темнохвойные оптимального развития. Этот ландшафт объединяет фации равнинные и днищ котловин елово-кедровые с лиственницей; долинные еловые с лиственницей смешанно-кустарниковые травяно-зелено-мошные; подгорные с ерниковым подлеском; подгорных равнин пихтово-кедровые мохово-травяные. Годовой сток, как и в предыдущих двух типах ландшафта, очень высокий — 690 мм. Формируется сток в основном в весенне-летний период, в осенне-зимний (в основном зимой) наблюдается его аккумуляция — 30 мм.

XIV. Горно-таежный сосновый ландшафт объединяет на рассматриваемой территории четыре фации: плоских поверхностей и склонов с подлеском из рододендрона даурского; лиственнично-сосновых травяных с кустарниковым подлеском, оstepненные. Несмотря на присутствие сосны, по-видимому, большее влияние на сток оказывает наличие оstepненных участков. В течение года происходит незначительная аккумуляция влаги (35 мм), в основном за весенне-летний период (23 мм). В зимний сезон сток практически отсутствует.

XV. Подгорный подтаежный сосновый ландшафт включает фации: равнинные с подлеском из рододендрона даурского, днищ котловин; подгорных равнин кустарниково-травяные оstepненные; долинные лугово-тальниково-тополево-сосновой серии; долинные с лиственницей травяные и оstepненных лугов.

В течение года водоотдача с территории данного ландшафта достигает 400 мм. За весенне-летний период формируется значительная часть стока — 70 %. В осенне-зимний период сток равен 100 мм, из них треть составляет зимний. Сток за половодье достигает 100 мм, а за паводок — 40 мм.

XVI. В данный ландшафт были объединены горные западно-забайкальского даурского типа высоких равнин и денудационных останцов онон-аргунские ландшафты.

Годовой сток в общем балансе водосбора отрицательный — 75 мм. В основном аккумуляция влаги происходит в весенне-летний период (70 мм), а возможен осенне-зимний (20 мм) при минимальном зимнем стоке 0,8 л/( $\text{с} \cdot \text{км}^2$ ). Потери стока за период весеннего половодья составили 8 мм.

Следует подчеркнуть, что полученные значения водоотдачи имеют приближенный характер и отражают структурные соотношения между различными фазами внутригодового распределения стока. В бассейне р. Селенги можно выделить пять групп ландшафтов, сходных по этим соотношениям. Первая включает в себя гольцовые

и подгольцовые ландшафты; во вторую группу можно отнести ландшафты горно-таежные лиственничные ограниченного, редуцированного и оптимального развития; в третью — межгорных понижений лиственнично-таежные; в четвертую — горно-таежные темнохвойные; в пятую — горно-таежные оステненные ландшафты. Общность водоотдачи в ландшафтах первой группы объясняется сходными условиями ее формирования. Сток с данных территорий наблюдается в течение всего года (годовая величина колеблется от 250 до 500 мм), причем формирование годового стока происходит в основном в весенне-летний период (200—250 мм). В осенне-зимний период сток распределяется равномерно: суммарный достигает 45—130 мм, на зимние месяцы (XII—III) приходится около 20—70 мм. Значительные различия в стоке наблюдаются в период половодья (от 0 до 100 мм), что связано с преобладанием в подгольцовых и гольцовых ландшафтах выровненных поверхностей, троговых долин с зарослями кедрового стланика и ерника, в то время как в гольцах имеются заболоченные территории. Объемы стока за паводок в этих ландшафтах практически не различаются — 43—52 мм ( $h_{5\%} \approx 118—196$  мм). Минимальный сток характеризуется следующими модулями: летний и зимний 30-дневный составляет соответственно 2,5—5,0 л/(/с·км<sup>2</sup>), суточный — 0,6—7,5 и 1,1—3,4 л/(/с·км<sup>2</sup>).

Общность гидрографов стока с ландшафтами второй группы определяется условиями его формирования в пределах территорий, покрытых горно-таежными лиственничными лесами. Внутригодовое распределение стока примерно такое же, как и в первой группе, но имеется ряд различий. Так, в зимний сезон сток практически отсутствует. Половодье и паводок имеют практически одинаковые слои стока ( $h_{5\%} \approx 40—50$  мм). Модули минимального зимнего и летнего стока резко различаются.

В третью группу объединяются ландшафты, формирование стока в которых происходит в долинах с болотно-луговой растительностью. Годовой водный баланс отрицательный (104—108 мм). Аккумуляция влаги наблюдается в основном в весенне-летний период (75—147 мм), в меньшей степени осенью и зимой (2—32 мм), причем в зимний период сток практически отсутствует. К этой группе ландшафтов по условиям распределения годового стока по сезонам также отнесены подгольцовые редколесные темнохвойные и лиственничные ландшафты. На формирование их стока оказывает влияние наличие оステненных участков. За весенне-летний период водный баланс ландшафтов отрицательный и возможна аккумуляция влаги в пределах их территории (90 % годовой величины). В осенне-зимний период, в основном в зимние месяцы, начинается водоотдача.

К четвертой группе отнесены горно-таежные темнохвойные ландшафты. Значительное влияние на формирование и распределение стока в годовом разрезе оказывают кедровые и темнохвойные леса. Водоотдача с территорий этих ландшафтов очень высокая (400—700 мм), причем сток формируется в основном в весенне-летний период (300—600 мм), а в зимний сезон может наблюдаться незначительная аккумуляция (10—30 мм). Слой стока за паводок более 96

устойчив (30—140 мм), чем за половодье (2—350 мм), что объясняется наличием мха и развитым подлеском, высокими инфильтрационными свойствами пород и грунтов, слагающих данные территории.

В пятую группу объединены ландшафты долин и высоких равнин с лугово-злаковой степной и лугово-болотной растительностью. Значительное влияние на формирование стока оказывает остепнение ландшафтов. В течение года эти территории выступают как аккумуляторы влаги (35—75 мм). Зимний сток практически отсутствует. В половодье и в паводок здесь характерна высокая водоотдача: модули летнего месячного стока очень высокие — 14,8—29,9 л/(с×Х км<sup>2</sup>). Зимой наблюдается снижение водоотдачи в 5—10 раз, а в подгорных ландшафтах отмечается даже аккумуляция влаги.

Из рассмотренных распределений показателей водоотдачи в годовом разрезе наиболее устойчивые имеют гольцовые, подгольцовые и горно-таежные лиственничные ландшафты. Формирование речного стока в бассейне р. Селенги идет в основном в их пределах и с горно-таежных темнохвойных ландшафтов. Степные и остепненные, а также долинные и заболоченные ландшафты выступают как аккумуляторы влаги и характеризуются отрицательными водными балансами, поэтому сток с них практически отсутствует или незначителен в зимние месяцы (XII—III).

## **2.7. ВОДООХРАННО-ЗАЩИТНАЯ РОЛЬ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ**

Леса Приморского края, территории которого на 80 % занята горной системой Сихотэ-Алиня, относятся в основном к горным типам. Общая лесистость региона сравнительно высокая — 74 %. Насаждения с преобладанием хвойных пород занимают 59 % покрытой лесом площади. Здесь распространены в основном елово-пихтовые, широколиственно-кедровые и кедровые леса.

Огромная водоохранно-защитная роль горных лесов края отмечалась многими исследователями. В Приморье специальное изучение гидро-климатического режима лесных формаций как основы для количественной оценки многосторонних свойств лесов начато в 1959 г. Результаты этих исследований отражены в ряде работ [Волков, 1965, 1968; Тарапанова, 1967, 1973; Тарапанов, 1970, 1974; Жильцов, 1973, 1982; Опритова, 1978; Прилуцкий, 1981]. В них отмечалось, что водорегулирующая роль леса проявляется в активном воздействии на водный баланс территории, особенно на его расходные составляющие — сток и суммарное испарение. Леса на горных склонах препятствуют поверхностному стоку, способствуют более равномерному грунтовому питанию рек и являются мощным противоэрозионным фактором.

Поверхностный сток в хвойно-широколиственных лесах определен во многом водно-физическими свойствами лесных почв, которые представлены бурыми горно-лесными и горно-таежными кислыми (бурыми таежными) типами. Первые занимают широкий пояс высотного распространения в южной части Сихотэ-Алиня (от 200 до 800—

900 м над ур. м). Горно-таежные кислые почвы на юге Приморья распространены на высоте от 800—900 до 1100—1200 м над ур. м.

Для бурых горно-лесных почв характерны высокие показатели фильтрации влаги, что неоднократно отмечалось для различных районов их распространения [Жильцов, 1975]. Коэффициенты фильтрации для почв на склонах под пологом хвойно-широколиственных лесов составляют: для подстилки 9—18 мм/мин; гумусового горизонта 3,8—6,0; элювиального — 2,5; иллювиального — 1,2—2,8 мм/мин. Инфильтрационные свойства горно-таежных кислых почв изучены недостаточно. По данным А. П. Клинцова [1969], на о-ве Сахалин водопроницаемость этих почв также очень высокая. Коэффициенты фильтрации составляют 4,8—6,5 мм/мин.

Интенсивность поступления осадков в Приморском крае иногда достигает 2—3,8 мм/мин при слое до 163 мм. Однако из-за высокой инфильтрационной способности лесных почв практически нет условий для возникновения поверхностного стока. Это подтверждается исследованиями, проведенными на стоковых площадках и методом дождевания в хвойно-широколиственных лесах южной, центральной и северной частях Приморского края [Таранков и др., 1972]. Сток как талых, так и дождевых вод при неповрежденных лесных почвах не превышал 1—5 % от осадков. Только удаление подстилки, верхних слоев почвы и ее уплотнение вызывают значительное увеличение поверхностного стока (до 65 % от нормы дождевания). Подобные результаты получены на лесных стоковых площадках Приморской воднобалансовой станции [Гарцман и др., 1967].

Внутрипочвенный сток в корнеобитаемом слое почвы также не-значителен. Наблюдения на площадках, устроенных для учета стока по почвенным слоям 0—50 и 50—100 см, показали, что его величина под пологом хвойно-широколиственного леса составляет 1,0—4,7 % от осадков, а летом он практически отсутствует.

О количестве влаги, поступающей в слои почвогрунтов глубже 1 м, дают представление результаты наблюдений, полученные нами на инфильтрационной площадке, построенной в нижней части юго-западного склона на вырубке на территории Верхнеуссурийского стационара. За 5-летний период просачивание воды составило от 6,3 до 19,9 % поступивших осадков, достигая весной своего максимума — 12 мм/сут. Количество влаги, фильтрующейся через метровый почвенный слой на различных участках, может отличаться от приведенных величин. Эти различия обусловлены изменчивостью потерь влаги на доведение влажности почвы до наименьшей влагоемкости. Потери определяются механическим составом, мощностью и каменистостью почв и подстилающих их грунтов. По данным И. Н. Гарцмана [1971], такие потери для бассейнов малых рек достигают 70—80 мм. Водоотдача с участков возрастает при высокой каменистости, легком механическом составе почв, незначительной мощности рыхлых отложений над относительным водоупором.

Просачившаяся влага концентрируется на относительном водоупоре, по которому осуществляется контактный сток. Он происходит не по всей площади склона, а концентрируется по микропониженным

в подповерхностную дренажную ручейковую сеть [Гарцман, 1973], по которой стокообразующая часть осадков поступает в водотоки.

Сезонное промерзание почв, несмотря на значительную глубину, не приводит, как это характерно для некоторых других районов страны, к значительному увеличению поверхностного и внутриводного стока. Промерзание в центральной части края наблюдается в течение 70—237 сут. В отдельные годы промерзание почвы из-за мощного снежного покрова и благоприятных температурных условий начинается только в середине января. Полное оттаивание почвы наблюдается в конце мая — середине июня. После исчезновения снежного покрова длительность периода с мерзлой почвой составляет от 7 до 61 сут. Максимальная глубина промерзания изменяется от 35 до 150 см и более, а толщина слоя мерзлой почвы после окончания снеготаяния варьирует от 9 до 150 см. Оттаивание почвы происходит с интенсивностью 0,8—5,6 см/сут, что соответствует 0,08—0,76 см на каждый градус положительной среднесуточной температуры.

В Приморском крае сезонное промерзание почв является одним из факторов, обеспечивающих относительную равномерность весенне-и раннелетнего речного стока. Атмосферные осадки холодного периода года проходят через два этапа регулирования: внутриснежный и почвенно-грунтовый [Гарцман и др., 1971]. Часть талых вод, расходуемых на формирование речного стока, образуется при оттаивании почвогрунтов и истощении избыточных запасов влаги в них, что определяет более равномерное поступление воды в гидрографическую сеть. Поэтому для оценки водоохранно-защитной роли леса в весенний период нами использованы продолжительность размеззания и толщина мерзлого слоя почвы после окончания снеготаяния на всей площади бассейна водотока. Выделено четыре группы насаждений, различающихся этими показателями. Наиболее высокими водоохранно-защитными свойствами в весенне-раннелетнее время обладают сложные, высокополнотные леса с преобладанием хвойных пород, произрастающих на пологих и покатых склонах северной экспозиции в верхней части бассейна. Они несколько ниже у подобных лесов в средней части бассейна. Наименьшие водоохранно-защитные свойства характерны для лиственных лесов и молодняков, возникших в результате проведения рубок главного пользования. Проведение рубок снижает водоохранно-защитные свойства на 1—2 балла. Это снижение прослеживается и через 20 лет после проведения рубок.

Естественную водность рек поздней весной и ранним летом, очевидно, можно сохранить в бассейнах водотоков различного порядка только направленным сбережением лесных участков, водоохранно-защитная роль которых достаточно высока. Согласно Р. В. Опритовой [1978], можно считать, что лесистость бассейна каждого водотока не должна опускаться ниже 50 % всей площади лесов, водоохранная роль которых оценивается высоким баллом. Это обеспечит режим половодья с минимальными отклонениями от естественного процесса.

Водорегулирующее воздействие леса на русловой сток элементарного водотока в летне-осенний период проявляется в увеличении

времени склонового добегания, снижении максимальных модулей и увеличении относительной подземной составляющей стока. Для элементарного водотока, водоносор которого покрыт хвойно-широколиственным лесом, время склонового добегания составляет 63—90 ч, что на 20—30 ч больше, чем для водосборов, частично пройденных сплошными рубками (на 62 и 22 % всей площади). Время склонового добегания остается меньшим и через 12 лет после проведения рубок, хотя эти изменения составляют не более 1—16 ч.

В облесенном элементарном водотоке общий летне-осенний русло-вой сток, составляющий 50—570 мм, увеличивается на 26—136 % после проведения сплошных рубок. По мере естественного зарастания вырубок сток с бассейнов, частично пройденных рубками, постепенно снижается до значения стока с бассейна, покрытого коренными лесами. Длительность этого процесса около 8 лет. Увеличение общего стока происходит за счет его поверхностной составляющей. Подземное питание для бассейна, полностью покрытого коренными лесами, составляет 17—41 % от общего стока. В течение 4—6 лет она остается выше в 1,5—2,5 раза, чем для тех бассейнов, где были проведены рубки.

Максимальные модули суточного стока в облесенном бассейне составляют 22—640 л/с·км<sup>2</sup>. Сплошные рубки предопределяют увеличение их в 1,3—3,6 раза. Только на восьмой год после проведения рубок на водосборной площади бассейна этот показатель достигает величин, близких к характерным для полностью облесенного бассейна.

Такие изменения характера руслового стока после проведения рубок отмечаются для водотока первого порядка, долина которого ориентирована на север. Для водотоков с долинами, открытыми к югу, изменение стока при рубках будет более существенным, так как сокращение транспирации и задержания осадков лесным пологом в первые годы после рубок приводят к образованию больших объемов стока.

Характер атмосферного увлажнения в Приморье определяет наличие периодов с избыточным и недостаточным поступлением осадков в течение года. В периоды с максимальным увлажнением водорегулирующая роль леса приобретает особое значение. Для комплексной оценки водорегулирующей роли различных лесов нами

применен коэффициент водорегулирования:  $KB = \frac{Z_{oc} + (HB - B_{cp})}{X}$ , где

$KB$  — коэффициент водорегулирования;  $Z_{oc}$  — задержание осадков кронами деревьев с момента полного размёрзания почвы до конца гидрологического года, мм;  $HB$  — запасы влаги в почве до глубины 1 м при наименьшей влагоемкости, мм;  $B_{cp}$  — запасы влаги в почве до глубины 1 м, средние для расчетного периода, мм;  $X$  — среднее количество осадков для расчетного периода, мм.

Для широколиственно-кедровых лесов Приморья  $KB$  составляет 0,35—0,47; кедрово-еловых лесов — 0,15—0,20; ельников — 0,18. Для лесных формаций южной части края (200—250 м над ур. м.)

свежие широколиственно-кедровые леса имеют КВ, равный 0,20; свежие чернопихтово-широколиственные леса — 0,38. В результате сплошных рубок в коренных сложных высокополнотных широколиственно-кедровых лесах, обладающих наибольшей водорегулирующей способностью, коэффициент водорегулирования снижается в 3—4 раза. В лесах с преобладанием темнохвойных пород рубка древостоев вызывает снижение водорегулирующей способности в 0,8—2 раза.

## Глава 3

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ

Лесохозяйственная деятельность (вырубки и лесовосстановительные мероприятия, лесоразведение в условиях полевых водосборов, гидролесомелиорация и др.) оказывает существенное влияние на гидрологический режим отдельных геосистем, а при широкомасштабном характере — на водный режим и климат отдельных природных зон. При таких видах мероприятий, как вырубка лесов, наиболее резкие изменения, носящие подчас катастрофический характер, происходят в первые годы после их проведения. В других случаях, при лесоразведении, изменения происходят медленно, но с постоянными тенденциями. В итоге особенности гидроклиматического режима приобретают устойчивый характер.

Как показали исследования, выполненные в последние годы, водорегулирующая и водоохранная роль леса в полном объеме может быть выяснена только в том случае, когда она рассматривается в течение всего цикла развития лесонасаждений и с учетом принадлежности к определенному типу лесных геосистем. Широко известны исследования в этой области А. А. Молчанова, А. В. Побединского, А. И. Миховича. Комплексные экспериментальные исследования были организованы ВНИИЛМ Гослесхоза СССР на Урале и Северном Кавказе, Харьковским НИИЛХ на Украине, институтами СО и ДО АН СССР в Сибири и на Дальнем Востоке, ГГИ на Валдае, Лабораторией лесоведения АН СССР в центральных областях, а также другими научными учреждениями.

В данной главе приводятся результаты исследований изменений гидрологических функций лесных геосистем под влиянием лесохозяйственной деятельности, выполненных в различных регионах нашей страны.

#### 3.1. ВЛИЯНИЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВОДООХРАННОЙ И ПОЧВОЗАЩИТНОЙ РОЛИ ЛЕСОВ

Все леса в той или иной степени выполняют водоохраные и почвозащитные функции. Однако степень выполнения этих функций неодинакова и зависит от географических особенностей каждого региона, лесоводственно-таксационных показателей древостоев, их возраста, характера лесохозяйственных мероприятий и других факторов. Даже в пределах одного лесного массива одни участки (напри-

мер, насаждения вдоль рек, вокруг озер и водохранилищ, на круtyх склонах, у истоков ручьев, речек и др.) имеют большое стокорегулирующее и почвозащитное значение, другие (на ровных местах и пологих склонах) — меньшее.

Горным лесам в гораздо большей степени присуща водоохранно-защитная роль, чем равнинным. Вместе с тем следует отметить, что отдельные высотно-поясные комплексы выполняют ее неоднозначно. Особенно велика роль леса по границам с горной тундрой, альпийскими и субальпийскими лугами. Так, на Северном Урале высота снежного покрова в древостоях, расположенных по границе с тундрово-гольцовским комплексом, достигает 4—5 м [Горчаковский, 1952]. Снежный покров, содержащий огромное количество воды, тает медленно и обуславливает поддержание высокого уровня воды в реках в меженный период. На высокогорье осадков выпадает значительно больше, чем в предгорьях, и водоохранная роль лесов здесь наиболее значительна. Поэтому приемы ведения лесного хозяйства должны быть отличными в различных высотно-поясных комплексах.

В лесах нашей страны ежегодно на миллионах гектаров проводятся различные лесохозяйственные мероприятия (рубки главного и промежуточного пользования, очистка мест рубок, лесовосстановительные работы и др.), которые оказывают существенное влияние на их гидрологические свойства. Одни из мероприятий могут значительно повысить водоохранную роль леса, другие — снизить.

В результате рубок и проведения лесосечных работ без соблюдения лесоводственных требований происходит ухудшение водно-физических свойств почв, снижается их инфильтрационная способность, увеличивается поверхностный сток и, как следствие, усиливается эрозия почвы. В свою очередь, ухудшается плодородие лесных почв, снижается продуктивность восстанавливющихся древостоев. Водоохраные свойства нового поколения леса не восстанавливаются значительный период, особенно на тех площадях, где наблюдается смена хвойных пород на лиственные [Побединский, 1979]. Кроме того, уменьшается пополнение подземных вод, ухудшается гидрологический режим рек, что наносит большой ущерб сельскому хозяйству, промышленным предприятиям, населенным пунктам, расположенным около водотоков. Поэтому при проведении всех хозяйственных мероприятий необходимо стремиться сохранять лесную среду и повышать ее водоохранную и почвозащитную роль.

Все многообразие способов рубок леса можно объединить в три группы, или три системы: сплошные (сплошнолесосечные), постепенные и выборочные. Разные способы рубок оказывают неодинаковое влияние не только на лесовосстановительные процессы, но и на микроклимат, поступление осадков к поверхности почвы, снеготаяние, замерзание и размораживание почвы, ее водно-физические свойства, что влияет на формирование стока и на эрозионные процессы.

В таежной зоне и горных лесах нашей страны доля зимних осадков весьма значительна (до 50 % и выше от годовой суммы). Весной здесь обычно наблюдается бурное снеготаяние и обильный сброс

тальных вод. В древостоях, пройденных выборочными и постепенными рубками, снегозапасы вследствие снижения сомкнутости крон обычно больше, чем в незатронутых рубками лесах. После сплошных узколесосечных рубок снегозапасы также увеличиваются. Несколько иная картина наблюдается на сплошных концентрированных вырубках. На тех участках, где полностью уничтожен подрост и тонкомер, запас воды в снежном покрове вследствие сдувания снега к опушке леса и в понижения обычно меньше, чем в лесу.

Способы рубок оказывают большое влияние не только на снегоотложение, но и на интенсивность и продолжительность снеготаяния. Если после постепенных и особенно выборочных рубок интенсивность таяния увеличивается, а продолжительность снижается на сравнительно небольшую величину, то на сплошных вырубках его интенсивность возрастает в 1,5—2 раза. Ускоренное снеготаяние и слабая водопроницаемость почв на сплошных вырубках способствуют образованию интенсивного стока. Под влиянием сплошных концентрированных рубок изменяется не только объем стока, но и его составляющие. Так, наблюдения в ельнике сложном с тяжелыми суглинистыми почвами (Красноключевской станционар, Башкирская АССР) показали, что если под пологом леса поверхностный сток составляет 28 %, а внутрипочвенный 72 % от суммарного, то на сплошной вырубке даже с малонарушенной почвой это соотношение меняется — 58 и 42 %. Такая же тенденция отмечена и в других регионах страны, например в Карпатах [Чубатый, 1984а, б].

В пределах одной и той же географической зоны влияние сплошных рубок на сток зависит от типа леса. В лишайниковых, вересковых, брусличниковых борах после сплошных вырубок обычно не наблюдается резкого увеличения поверхностного стока, так как и после рубки песчаные и супесчаные почвы имеют высокую водопроницаемость. На сплошных узколесосечных вырубках запасы снега намного больше, чем на сплошных, почва промерзает на меньшую глубину, снег тает медленнее, поэтому этот вид рубки в меньшей мере снижает водоохраные и водорегулирующие функции леса. На лесосеках шириной 50—100 м на песчаных и супесчаных и других хорошо водопроницаемых почвах водоохранная роль древостоев часто не отличается от насаждений, где проводились постепенные и выборочные рубки.

В целом исследования показали, что при выборочных и постепенных рубках водно-физические свойства почв изменяются незначительно. Исключение составляют лишь те случаи, когда в процессе рубки значительно снижается сомкнутость древостоя (ниже 0,5). При выборочных рубках слабой интенсивности (до 25 % общего запаса) весенний поверхностный сток увеличивается не более чем на 10 %. Длительно-постепенные рубки (удаление в первый прием до 50—60 %) в темнохвойных лесах Среднего Урала увеличивают поверхностный сток по сравнению с невырубленным водосбором в 2—2,5 раза, сплошные концентрированные в тех же условиях — в 6 раз.

Усиление поверхностного стока в результате рубок часто сопро-

вождается эрозионными процессами (смык и снос почвы, оврагообразование и пр.). Эрозионные процессы более значительны при сплошных рубках, чем при выборочных и постепенных. На сплошной вырубке ельника нагорного Среднего Урала годовой смык почвы составил  $9,7 \text{ м}^3/\text{га}$ , а при выборочной рубке в том же типе леса —  $3,7 \text{ м}^3/\text{га}$ . На сплошной вырубке ельника мшисто-разнотравного того же района смык почвы достиг  $21,6 \text{ м}^3/\text{га}$ , при длительно-постепенной он был в 2 раза меньше. На смык почвы влияет также ширина лесосек. В горных районах при увеличении ширины сплошных лесосек от 50 до 200 м смык почвы увеличивается в 2—3 раза, до 400 м — в 4—5 раз [Молчанов, 1960].

Сплошные рубки влияют на изменение гидрологического режима рек, на температуру и качество воды. Температура воды, проходящей через сплошную вырубку, выше на  $5—6^\circ\text{C}$  по сравнению с водой, поступающей из естественных насаждений. Изменение температурного режима воды отрицательно сказывается на нересте и инкубационном развитии икры, особенно лососевых рыб. Вода, поступающая со сплошных вырубок в летний период, имеет повышенное содержание аммиака, повышена ее окисляемость. Постепенные и выборочные рубки, особенно проводимые в зимний период, в значительно меньшей степени изменяют эти качества воды [Дробников, 1973].

Снижение водоохранно-защитной роли лесов после сплошных концентрированных рубок наблюдается продолжительное время, иногда десятки лет. Исключение составляют те вырубки, где после лесозаготовок сохранилось достаточное количество хвойного подроста. Протекающая в настоящее время под влиянием сплошных концентрированных рубок смена хвойных лесов на лиственные часто, особенно в горных условиях и районах с расчлененным рельефом, снижает водоохранно-защитные функции лесов.

Таким образом, из всех способов рубок, применяемых для заготовки древесины, наибольшие изменения в водоохранно-защитную роль лесов вносят сплошные концентрированные рубки. Отрицательное влияние этих рубок особенно сильно проявляется в горных лесах и в районах с холмистым рельефом. При значительных объемах этих мероприятий и снижении лесистости водосборных бассейнов рек ниже 50 % возрастает паводочный сток и уменьшается уровень воды в меженный период. При осуществлении рубок необходимо стремиться к их равномерному распределению по всему бассейну реки, не допуская одновременно сплошной рубки леса на всей площади даже малых водосборов, ручьев и речек, так как это приводит к пересыханию водных источников в летний период. На тех водосборах, где лесопокрытая площадь составляет менее 50 %, возможны только выборочные и постепенные рубки.

В нашей стране более половины покрытой лесом площади приходится на область распространения вечной мерзлоты. Эти леса очень ранимы, и под влиянием антропогенных воздействий в ряде случаев в них могут происходить необратимые негативные процессы. Такие леса в настоящее время усиленно вовлекаются в промышленную

лесоэксплуатацию. Сплошные рубки способствуют оттаиванию почвы и образованию термокарста. Вследствие таяния подземных льдов почва начинает проседать и образуются понижения. После вытаявания подземного льда, если его мощность была достаточно большой, на месте просадки грунта образуются озера [Поздняков, 1983]. В полярных и горных районах области вечной мерзлоты часто наблюдается сползание по мерзлому грунту оттаявшего слоя суглинистой или пылеватой почвы, перенасыщенной влагой. Частичное удаление деревьев при выборочных и постепенных рубках меньше влияет на глубину оттаивания почвы, а следовательно, образование термокарста и оползневых явлений. Разработка рациональных способов рубок в мерзлотно-таежных лесах является первоочередной задачей науки.

Современные виды механизированных лесозаготовок особенно в летний период не меньше, чем способы рубок, изменяют лесную среду. При применении лесозаготовительной техники на лесосеках существенно нарушается напочвенный покров и верхние горизонты почвы. В сосняках лишайниковых, брусличных обычно лесная подстилка сдирается или перемешивается с верхними горизонтами почвы. В сосняках и ельниках черничных, долgomошных она вдавливается в почву. Верхние горизонты, особенно суглинистых и глинистых почв, сильно уплотняются. В результате ухудшаются водно-физические свойства и инфильтрационная способность почв. Если на участках, не измененных трелевкой, поверхностный сток при выпадении осадков наблюдается редко, то на измененных и особенно сильно уплотненных он бывает даже при малоинтенсивных осадках.

На мокрых и влажных почвах, которые характерны более чем для 70 % таежных лесов, уже через два-три рейса трактора волоки, не укрепленные порубочными остатками, становятся непригодными для трелевки. Поэтому трактор с каждой пачкой деревьев проходит по новому следу. В результате волоки расширяются настолько, что часто занимают почти всю площадь лесосеки.

Особенно резко ухудшаются свойства почв после применения в бесснежный период тракторов с высоким удельным давлением на грунт. Нередко на суглинистых и глинистых мокрых почвах после применения такой техники водопроницаемость почвы снижается в десятки раз. Резкое ухудшение водно-физических свойств почвы приводит к полной утрате водоохранно-защитных функций участками леса, пройденными рубками. Коэффициент поверхностного стока возрастает более чем в 200 раз, внутрипочвенный сток полностью исчезает, а интенсивность процессов водной эрозии увеличивается в сотни раз [Данилик, 1979].

Вследствие удаления при летних лесозаготовках подстилки и ухудшения водно-физических свойств почва промерзает на большую глубину и обычно не успевает оттаять до полного схода снежного покрова. Поэтому весь весенний сток сбрасывается по поверхности, ухудшая гидрологический режим рек. В результате усиливаются весенние паводки, пересыхают ручьи и речки в меженный период.

Возобновление леса можно осуществлять как естественным, так

и искусственными путем. Не все способы возобновления оказывают одинаковое влияние на изменение водно-физических свойств почвы, а следовательно, ее водоохранно-защитные свойства. При естественном возобновлении, особенно предварительном и сопутствующем (постепенные и выборочные рубки), подготовку почвы не проводят. При последующем естественном возобновлении подготовка почвы заключается в удалении подстилки полосами и площадками (сосняки лишайниковые) или перемешивании подстилки с верхними минеральными горизонтами почв (сосняки брусничные). При этом применяются легкие лесокультурные орудия, обычно не вызывающие нарушения стокорегулирующей роли леса.

При искусственном возобновлении леса обычно производится подготовка почвы, часто с применением плугов и бульдозеров. Подготовка почвы с применением таких лесокультурных машин, особенно в горных условиях, надолго ухудшает водно-физические, а следовательно, стокорегулирующие и защитные свойства почв. Так, на вырубках с дерново-слабоподзолистыми почвами при подготовке ее бульдозерами коэффициент стока увеличился в 10 раз по сравнению с естественной поверхностью почвы. При подготовке почвы под лесные культуры плужными бороздами вдоль склона коэффициент СТОКА УВЕЛИЧИЛСЯ В 6—9 раз по сравнению с участками, где эта работа не проводилась. При прокладке борозд по горизонтальным стокам практически не изменяется.

Особенно значительно ухудшаются водно-физические свойства почв при корчевке пней, которую проводят в целях создания благоприятных условий для работы лесокультурных машин. Установлено, что корчевка пней, особенно в сосняках черничных и долгоношных на тяжелых суглинистых и глинистых почвах, ухудшает структуру почвы, нарушает поры и пустоты биологического происхождения (ходы червей, пустоты сгнивших корней и т. д.), по которым гравитационная влага поступает в нижние слои почвогрунта. Вследствие таких изменений ухудшается плодородие почвы, снижается ее аэрация и уменьшается водопроницаемость. В условиях холмистого рельефа при проведении борозд вдоль склона, раскорчеванные полосы превращаются в исходные пункты возникновения эрозионных процессов.

Наблюдения показали, что водоохранно-защитные функции лесов долго не восстанавливаются на тех вырубках, где культуры создаются на площадках, подготовленных бульдозерами и корчевателями. Здесь смыкание древостоя растягивается на 30—40 лет. Особенно удлиняется период смыкания на тех площадках, где проводятся сенокошение и пастьба скота. Следовательно, указанные способы подготовки почвы и создание лесных культур не способствуют выполнению основной задачи горного лесоводства — усилиению водоохранно-защитной роли лесов. Создание лесных культур в условиях холмистого рельефа и в горных лесах должно иметь принципиальные отличия от равнинных лесов. В горных лесах, особенно на южных склонах, густота посадки культур должна быть несколько выше, чем на равнинной территории. Это сокращает период смыкания крон,

а следовательно, способствует быстрому восстановлению насаждений, способных выполнять водоохранно-защитные функции.

Таким образом, в лесах, играющих водоохранно-защитную роль (защитные полосы, особо защитные участки, леса вокруг водохранищ и т. д.), а также в горных лесах должны шире применяться постепенные и выборочные рубки, обеспечивающие естественное возобновление леса и сохранение лесной среды.

Известно, что с помощью рубок ухода можно существенно изменять лесоводственно-таксационные показатели древостоя (изменение состава, строения, полноты и др.), а следовательно, влиять на водоохранно-защитные свойства лесов. Путем снижения полноты густых хвойных молодняков можно в 1,2—1,5 раза увеличить высоту снежного покрова и запас воды в нем. В лиственных молодняках и средневозрастных древостоях снижение полноты незначительно сказывается на снегонакоплении.

При одной и той же полноте древостоев снегозапасы в лиственных молодняках выше, чем в хвойных. Смешанные молодняки занимают среднее положение. Установлено, что интенсивность снеготаяния в лиственных молодняках значительно выше, чем в хвойных. Например, на Южном Урале самые низкие ее значения (8,9 мм/сут) наблюдались во взрослом разновозрастном елово-пихтовом насаждении, в 25-летнем хвойном молодняке интенсивность этого процесса была на 30 %, а в чистом 15-летнем лиственном молодняке — на 80 % выше [Ханбеков, Письмеров, 1973]. Чистые лиственные молодняки по интенсивности снеготаяния часто близки к сплошным вырубкам, тогда как пихтово-еловые молодняки, сформировавшиеся на сплошных вырубках из группового подроста и тонкомеря, мало отличаются по интенсивности снеготаяния от спелых темнохвойных древостоев средней полноты. Чистые лиственные молодняки и средневозрастные древостои по продолжительности таяния снега близки к невозобновившейся сплошной вырубке. В сомкнувшихся хвойно-лиственных молодняках продолжительность снеготаяния больше, чем в лиственных, и приближается к продолжительности в спелых темнохвойных древостоях. Следовательно, при проведении рубок ухода в молодняках (осветление, прочистки) необходимо стремиться к созданию хвойно-лиственных древостоев, так как они лучше выполняют водоохранно-защитные свойства, чем чистые, и особенно лиственные, древостои. По мере увеличения возраста древостоев участие лиственных пород надо уменьшать, и к возрасту спелости оно должно составлять не более 15—20 %.

Таким образом, одни мероприятия, например рубки ухода, способствуют усилению водоохранно-защитной роли лесов, другие — снижению. В различных географических условиях водоохранно-защитные функции лесов и их изменения под влиянием лесохозяйственных мероприятий проявляются по-разному. Сохранять и повышать водоохранную, водорегулирующую, почвозащитную и средообразующую функции лесов невозможно путем осуществления одного или нескольких мероприятий. Этого можно достичь только в случае комплексного подхода к проведению всех лесохозяйственных мероприятий.

### 3.2. ВЛИЯНИЕ РУБОК ЛЕСА НА СООТНОШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЕТС

Под влиянием лесохозяйственных мероприятий, особенно после сплошной вырубки леса, происходит существенное изменение состояния лесного биогеоценоза. В результате удаления древостоя изменяются условия поступления осадков и полностью прекращается задержание осадков кронами деревьев, практически отсутствует поглощение суммарной солнечной радиации растительным покровом, изменяется альbedo. В итоге перестраивается структура суммарного испарения и стока. В той или иной степени происходит изменение всех звеньев тепло- и влагооборота лесных геосистем. При благоприятных условиях этот процесс носит обратимый характер, и по мере естественного или искусственного лесовозобновления гидрометеорологический режим приближается к естественному типу, т. е. типу, характерному для спелого леса, его водоохранно-водорегулирующие свойства постепенно восстанавливаются.

Исследования изменений водорегулирующих и водоохранных функций лесных геосистем проводились на экспериментальных стационарных и временных объектах, расположенных в Новгородской и Калининской областях и включали наблюдения над элементами водного и теплового баланса. Стационарные объекты представлены малыми лесными водосборами, воднобалансовыми, стоковыми, испарительными и теплобалансовыми площадками Валдайского филиала ГГИ в условиях леса и поля. Временные объекты приурочены к участкам, где проводились лесохозяйственные мероприятия. К ним относятся стоковые и теплобалансовые площадки, пункты наблюдений над осадками, снегозапасами и испарением. Кроме водно- и теплобалансовых измерений изучался прирост древесной растительности на вырубках и экспериментальных участках с разновозрастным древостоем. Наблюдения над элементами водного баланса производились в соответствии с «Руководством воднобалансовым станциям» [1973].

Известно, что одной из важных водорегулирующих функций лесной растительности является ее способность перераспределять выпадающие осадки по вертикали. При этом осадки задерживаются пологом леса, проникают под полог и стекают по стволам деревьев. Структура перераспределения осадков не остается постоянной, а изменяется по мере роста древостоя, т. е. по мере изменения надземной части фитомассы. Наибольшее количество осадков (за май—сентябрь, в % от общего количества осадков) задерживается древостоем в возрасте 35—45 лет, когда они имеют наибольшее количество зеленой массы:

Возраст древостоя, лет	105	50	40	25
Ельники	36	36	53	34
Лиственные (береза, осина)	—	—	34	—

После проведения рубки леса существенно изменяются условия накопления твердых осадков. Особенно велики различия в снего-

заносах на небольших по размерам вырубках (до 500×500 м), что обусловлено аэродинамическим влиянием вырубки на поле скорости ветра в приземном слое атмосферы и, как следствие этого, на поле выпадения осадков. На вырубках малого размера (100×100 м и менее) значительное влияние оказывает граница окружающего леса, выполняющая роль экрана.

Измерения снегонакопления на различных по размеру вырубках показали, что при средних значениях угла их закрытости (от 10 до 50°) наблюдается увеличение — до 20 % — количества твердых осадков относительно окружающего лесного массива. Максимальное увеличение имеет место при углах закрытости 30—40° (размер вырубок 70×70 м). При углах закрытости более 60°, т. е. на вырубках малого размера (25×25 м), наблюдается уменьшение величины твердых осадков на 10—20 % по сравнению с лесом. Причем эти изменения не зависят от породного состава древостоя, окружающего вырубку лесного массива.

Испарение с леса Е может быть представлено в виде суммы  $E = E_n + E_s + E_t$ , где  $E_n$  — испарение с поверхности почвы и растительности под пологом леса;  $E_s$  — испарение задержанных кронами деревьев атмосферных осадков;  $E_t$  — транспирация древесной растительностью. Соотношение между отдельными составляющими суммарного испарения зависит от таксационных характеристик насаждения (тип леса, породный состав, возраст, полнота) и времени года.

Суммарное испарение, являясь одной из основных расходных статей водного баланса, во многом определяет водоохранную и водорегулирующую роль лесных территорий. После проведения вырубки леса меняются режим и структура суммарного испарения. В результате удаления древостоя прекращаются транспирация и испарение задержанных осадков, возрастает испарение с поверхности почвы. На свежих, а также одно- и двухлетних вырубках в еловых и сосновых лесах испарение с почвы (с лесной подстилки с единичными растениями) составляет 40—60 % суммарного испарения со спелого леса на контрольном участке.

Суммарное испарение с поверхности вырубки зависит от размера. Так, в сосновом лесу испарение с нарушенной лесной подстилки на вырубках малого размера (диаметром 100 м) оказалось меньше на 50 % суммарного испарения с леса, а на вырубках большого размера (200×200 и 500×500 м) составило соответственно 52 и 61 %. Аналогичные соотношения прослеживаются и для ельников (табл. 3.1).

Снижение испарения с уменьшением размера вырубки характерно и для заболоченных лесных массивов. Указанная тенденция сохраняется в первые годы после начала лесовосстановления. Наблюдения, проведенные за теплый сезон с 1980 по 1982 г., показывают, что испарение с вырубки диаметром 1500 м почти вдвое превышает испарение с вырубки диаметром 15 м, в 1,3 раза выше испарения с вырубки диаметром 160 м. Графическая форма зависимости испарения со свежих вырубок (1—2 года) и вырубок с лесовозобновлением (10—40 лет) разного размера к испарению со спелого леса

Таблица 3.1

Суммарное испарение с вырубок различного размера за теплый период года

Средний угол закрытости, град	Возраст вырубки, год	Вид испаряющей поверхности	Испарение		
			с леса, мм	с вырубки	
				мм	% от испарения с леса
<i>Сосновый лес (водосбор р. Березайка)</i>					
9	1	Лесная подстилка	289	150	52
3	1	» »	289	176	61
43	1	» »	47	21	45
37	6	Злаковые	130	87	67
12	6	»	130	116	87
9	3	Лесная подстилка	302	244	81
70	1	» »	85	21	25
<i>Еловый лес (водосбор оз. Едровское)</i>					
20	1	Лесная подстилка	135	71	53
70	2	» »	252	79	31
5	7	Злаковые	—	149	—
10	7	»	217	131	60
35	3	»	—	102	—

представлена на рис. 3.1. Следует отметить, что на зависимость испарения от размеров лесосек указывал А. А. Молчанов [1960] совместно с В. А. Губаревой [1980]. Соотношения испарения с лесных участков, представленных древостоями различного возраста, рассмотрены в ряде работ [Таранков, 1970; Федоров, Марунич, 1979; Чубатый, Крестовский, 1986]. Данные экспериментальных исследований, выполненных в этом направлении в Валдайском филиале ГГИ (в условиях южной тайги ЕТС), не указывают на значительную зависимость испарения от породного состава леса на вырубке. Только для сосняков отмечаются несколько меньшие величины (на 10 %) по сравнению с ельниками и смешанными (елово-лиственными) лесами. Общая тенденция изменения испарения с возрастом древостоя следующая: первый период — до 40 лет — интенсивное увеличение из года в год, в возрасте 40—50 лет имеют место наибольшие величины, в последующий период — постепенное уменьшение испарения.

Значительное снижение испарения на вырубках вызывает изменение этой величины и в целом водного режима на водосборе, особенно если на нем

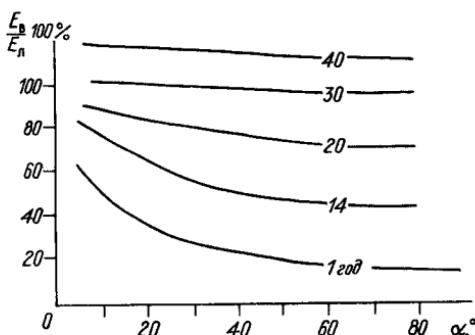


Рис. 3.1. Зависимость суммарного испарения, нормированного на испарение со спелого леса  $E_v/E_n$ , от размера (угол закрытости  $\alpha, ^\circ$ ) и возраста вырубок.

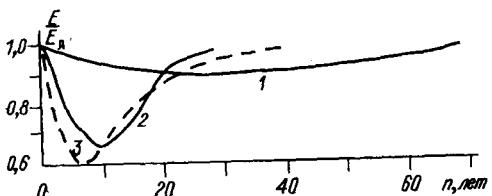


Рис. 3.2. Изменение суммарного испарения с водосбора с течением времени при рубках леса различной интенсивности.

Ежегодная вырубка территории, %:  
1 — 2; 2 — 10; 3 — 25.

велик объем рубок. При проведении единичной вырубки на малом водосборе изменение испарения можно оценить по графикам связи испарения, размера и возраста вырубки (см. рис. 3.1) или из соотношения

$$\bar{E}_n = \frac{1}{F} E_n (F - F_1) + \frac{1}{F} e_n F_1, \quad (3.1)$$

где  $\bar{E}_n$  — среднее испарение на водосборе;  $E_n$  — испарение с леса;  $e_n$  — испарение с вырубки на момент времени  $n$ ;  $F$  — площадь водосбора;  $F_1$  — площадь вырубки. При проведении рубок в различные годы среднее испарение

$$\bar{E} = \frac{1}{F} \left[ E_n (F - \sum_1^n F_n) + \sum_1^n e_n F_n \right]. \quad (3.2)$$

При проведении регулярных рубок различной интенсивности последнее выражение можно использовать для оценки или прогноза изменения испарения на водосборах. На рис. 3.2 показаны зависимости изменения испарений на водосборе при различных вырубках. При ежегодной вырубке 10 % площади водосбора минимальные значения испарения отмечаются через 8 лет после их начала и составляют 70 % от испарения с водосбора, покрытого спелым лесом. При ежегодной вырубке 2 % минимальное испарение будет иметь место через 25 лет и составит 89 %. В этом случае в течение длительного периода (порядка 40 лет) в целом для водосбора испарение будет пониженным. Наименьшее падение величин испарения на водосборе за весь цикл развития древостоя (от начала мероприятия до полного восстановления) отмечается при вырубке 25 % площади водосбора ежегодно.

Изменение испарения воздействует на режим влажности почв. Особенности распределения влагозапасов для типичных лесных геосистем Северо-Запада достаточно подробно рассмотрены в ряде работ [Капотов, 1969; и др.]. Основные различия отмечаются в отдельные сезоны года в верхних слоях почвогрунтов, прежде всего в верхнем 50-сантиметровом слое. В нижних горизонтах отклонения измеренных величин составляют около 1—5 %. Наибольшая амплитуда колебаний отмечается в зимние месяцы и обусловлена различным осенним увлажнением бассейнов, оттепелями и особенностями накопления влаги в процессе замерзания почвы.

В период от начала снеготаяния до полного оттаивания почвы и схода снежного покрова происходит накопление влаги в верхнем

метровом слое на 40—45 мм, далее до конца половодья идет расход влаги на такую же величину. За весь период весеннего половодья влагозапасы на лесных участках изменяются в пределах  $\pm 10$  мм. В весенне-летний период как на лесных, так и на полевых водосборах происходит уменьшение влагозапасов, которое продолжается до конца августа. В крайне засушливые годы в этот период в верхних слоях почвогрунтов могут наблюдаться запасы влаги, соответствующие влажности завядания растений. В осенний период (сентябрь—ноябрь) значительно увеличивается влажность почвы — до уровня, достигающего и превышающего наименьшую влагоемкость.

Исследования показали, что в течение гидрологического года запасы влаги в метровом слое почвы в лесу, как правило, выше, чем в поле. Эта разница особенно заметна в период интенсивной вегетации. Большие влагозапасы в лесу по сравнению с полем обусловлены в начале вегетации более продолжительным снеготаянием, в середине вегетационного сезона — большими затратами тепла на турбулентный теплообмен с нижними слоями атмосферы и относительно меньшим расходом тепла на испарение. В зимние месяцы отмечается обратное соотношение, что вызвано различными градиентами температуры в почве, лесу и поле. Такой характер изменения влагозапасов на лесных и полевых водосборах свойствен не только исследуемому району, но и другим районам лесной зоны ЕТС, что, в частности, хорошо прослеживается по многолетним данным Подмосковной воднобалансовой станции [Многолетние..., 1982].

Режим влажности почвогрунтов на вырубках имеет свои особенности [Побединский, 1976]. Важнейшими из них являются: 1) рост влажности почвы после сплошной рубки древостоя по сравнению с нетронутыми лесными массивами; 2) зависимость влагозапасов в почве от размера вырубки; 3) постепенное уменьшение избытка влаги из года в год по мере развития лесокультур на вырубке.

На первую из этих особенностей исследователи обратили внимание давно [Молчанов, 1960]. Образованию избытка влаги на вырубках благоприятствует накопление дополнительного количества твердых осадков и главным образом резкое сокращение суммарного испарения после удаления древостоя. Это явление отмечается в течение почти всего года. Максимальные увеличения влагозапасов наблюдаются на свежих вырубках летом в первый год после рубки и достигают в метровом слое ельников-черничников 70 мм, сосняков-брусничников 30—50 мм. Лишь в конце снеготаяния происходит временное выравнивание влагозапасов в почве на вырубке и в окружающем лесу.

Разница во влагозапасах в лесу и на вырубках в существенной мере зависит от их размеров. Наибольшие значения избытка влаги отмечаются на вырубках при угле закрытости 10—20°, что соответствует условиям максимального накопления дополнительных осадков. По мере зарастания вырубки травостоем и далее под влиянием восстанавливающихся лесокультур влагозапасы в почвогрунтах на вырубке и в прилегающем к ней лесу выравниваются.

Через 10 лет после рубки отклонения влагозапасов на этих участках становятся несущественными и находятся в пределах точности измерения влажности почвы.

Более корректные выводы можно сделать по материалам наблюдения за изменением уровней грунтовых вод на вырубках, которые измеряются с более высокой точностью. Но для этого необходим длительный ряд наблюдений. Режим грунтовых вод для различных ландшафтов исследован Х. А. Писарьковым [1954] и др. Из работы Н. И. Капотовой [1969], выполненной в рассматриваемом районе, следует, что режим уровней грунтовых вод в поле и в лесу практически не отличается по амплитуде и ходу колебаний в течение года. Различие проявляется в годы с глубоким промерзанием почвы, когда большая часть талой воды, особенно в поле, стекает поверхностным путем. В лесу даже мерзлая почва остается водопроницаемой, что способствует пополнению запасов грунтовых вод. Амплитуда колебаний уровней грунтовых вод как в лесу, так и в поле увеличивается с уменьшением водности года.

Режим грунтовых вод на вырубках имеет определенные особенности. Прежде всего для него характерно более высокое стояние уровня грунтовых вод по сравнению с прилегающим лесом. Этот факт отмечал Х. А. Писарьков [1954] для ельников Ленинградской области. По его данным, уровень грунтовых вод поднимался на вырубках на 40 см. Для сосняков Московской области подъем уровня составил 20—30 см [Молчанов, 1960].

В условиях южной тайги на свежей вырубке среди ельника-черничника в конце летнего сезона 1973 г. превышение уровня грунтовых вод составило 50 см, в теплый период 1974 г. — 20—30 см. Для более подробного изучения этого явления был организован специальный эксперимент на участке с ельником-кисличником вблизи вырубки 9-летнего возраста. В зимний период 1977 г. древостой на участке был вырублен и вывезен. После сплошной рубки резко изменился уровень грунтовых вод. Максимальное повышение уровня составило 70 см по сравнению с лесным массивом и 30 см по сравнению с 10-летней вырубкой. Разность отметок уровней грунтовых вод на вырубке и под пологом ельника-черничника (в см) была следующей:

Месяц	II	IV	VII	X
1974 г.	26	0	21	30
1977 г.	9	0	23	27
1978 г.	0	8	11	30
1982 г.	4	9	7	
1986 г.	4	0	4	10

В период весеннего снеготаяния начало подъема уровня грунтовых вод на вырубке наступило на 15—20 дней раньше, чем в лесу, что относится и к периоду наступления максимума и связано с временем начала водоотдачи из снежного покрова. Через год после рубки и далее из года в год идет постепенное снижение уровней под влиянием растущих лесонасаждений, что согласуется с изменением суммарного испарения и влагозапасов в зависимости от возраста

Таблица 3.2

## Поверхностный сток на вырубках разного возраста и в еловом лесу

Год	Площадка	Запас воды в снеге, мм	Осадки в период снеготаяния, мм	Глубина промерзания, см	Слой стока, мм	Год	Площадка	Запас воды в снеге, мм	Осадки в период снеготаяния, мм	Глубина промерзания, см	Слой стока, мм
1978	1	110	38	0	0,7	1980	1	105	10	22	0,9
	2	132	38	0	0,4		2	150	10	6	1,0
	3	133	38	0	1,4		3	148	10	0	12,3
1979	1	119	48	36	0,5	1981	1	90	27	20	—
	2	146	48	21	2,0		2	165	27	0	0,0
	3	151	48	20	46,3		3	189	27	7	2,2

вырубки. Полное выравнивание уровней грунтовых вод на вырубке и в лесу следует ожидать примерно через 15 лет после начала лесовозобновления.

Изменения элементов водного баланса, которые происходят после сплошных рубок, в конечном счете приводят к изменению режима стока. Влияние леса на сток проявляется в основном через экстремумы стока и прежде всего через различия в инфильтрационной способности мерзлых почв, аккумулирующей емкости верхних слоев почвы и интенсивности снеготаяния. На минимальный сток основное влияние оказывают некоторые изменения аккумулирующей емкости грунтов, потерю стока на испарение в летний период, а в зимний — глубины промерзания почвогрунтов.

Высокие весенние половодья формируются на полевых водосборах в основном за счет поверхностного стока. Модули максимального расхода суммарного стока 5-и 1 %-й обеспеченности составляют для малых лесных водосборов 200—300 л/(с · км<sup>2</sup>), для полевых — 1000—1500 л/(с · км<sup>2</sup>). Летний паводочный сток в лесу формируется за счет грунтового стока.

Под влиянием сплошной рубки леса режим стока резко изменяется. Во всех случаях, особенно в горных условиях [Клинцов, 1969; Чубатый, 1981; и др.], имеет место заметное его увеличение. По данным исследований А. А. Молчанова [1960], в условиях дубовых лесов Воронежской и Московской областей в первые годы после рубки коэффициент весеннего стока увеличился в 4—5 раз, а в отдельных случаях — в 10 раз. Затем по мере лесовозобновления он уменьшается. Для оценки изменения стока в ельниках после сплошных рубок были организованы наблюдения на трех стоковых площадках: 1 — в спелом еловом лесу (80—290 лет); 2 — на вырубке с возобновлением ели и березы (вырубка 1960 г.); 3 — на вырубке 1974 г.

Запасы воды в снеге на вырубках (площадки 2 и 3) больше, чем в спелом лесу (табл. 3.2). При этом во все годы наблюдений наибольшие значения стока имели место на вырубке 1974 г. и особенно значительны — в весеннее половодье 1979 г., когда он формировался на мерзлой почве. На старой вырубке и в условиях спелого леса сток был незначительным.

Изучение влияния лесохозяйственных мероприятий на сток проводилось также на малых водосборах рек Мошня, Холова и Полометь с площадью соответственно 688, 1500 и 432 км<sup>2</sup>. Лесистость речных бассейнов составляет 78, 75 и 81 %. На первых двух водосборах проводилась интенсивная рубка леса, а на последнем — лишь в ограниченных размерах. Поэтому он рассматривался как контрольный водосбор. По данным лесоустройства, проведенного в 1972 г., на первом водосборе общая площадь свежих вырубок и вырубок с молодым лесонасаждением в возрасте до 10 лет составляла 121 км<sup>2</sup> (18 % площади), а на втором — 145 км<sup>2</sup> (около 10 %). В период с 1960 по 1972 г. размеры ежегодных вырубок на этих водосборах составляли 1—3 %.

Результаты наблюдений за стоком показали, что до начала интенсивной рубки (до 1964 г.) коэффициент стока с этих водосборов был меньше, чем с контрольного, на 4—20 %. В период проведения интенсивной рубки леса (1964—1970 гг.) он резко увеличился, что оказалось особенно заметным в маловодном 1964 г. При годовой сумме осадков для этих водосборов 549, 549 и 535 мм, при интенсивности рубки леса 3 и 2 % увеличение годового стока с водосборов рек Мошня и Холова по сравнению с контрольным составило 8—18 %, а объем стока за весенне-половодье — 14—18 %. Повышенный сток отмечался и в период летней межени.

Для оценки и прогноза изменения коэффициента стока можно использовать выражения, аналогичные (3.1) и (3.2), а также зависимости стока от возраста вырубок [Марунич, Федоров, 1986]. Выполненные расчеты показывают, что в случае проведения концентрированных рубок на большой площади водосбора следует ожидать значительных изменений стока.

При вырубке 25 % площади ежегодно в первые 2—4 года годовой сток увеличится в 1,5 раза. В этом случае возможны такие отрицательные последствия сплошных рубок, как водная эрозия. Значительных изменений стока можно избежать, если проводить рубки с перерывами в 2—3 года. Особенно отчетливо это прослеживается при расчете изменений коэффициента годового стока при ежегодной рубке 10 и 25 % площади и с перерывами между этими рубками в 3 года (рис. 3.3).

Изменение водного режима на участках леса и водосборах, затронутых рубками леса, тесно связано и с изменением теплового режима. Эти изменения обусловлены действием двух факторов: воздействием поверхности на радиационные характеристики, особенно на альбено, и затенением поверхности вырубок стеной леса. Последнее особенно выражено на вырубках небольшого размера [Федоров и др., 1981].

Существенное отличие отражательной способности лесных и безлесных поверхностей проявляется в поведении интегральной характеристики — радиационного баланса, который для лесных участков выше, чем для безлесных. В среднем за вегетационный период радиационный баланс спелого елового леса в июне на 16 %, в июле и августе на 20 и в сентябре на 50 % выше, чем поля. По

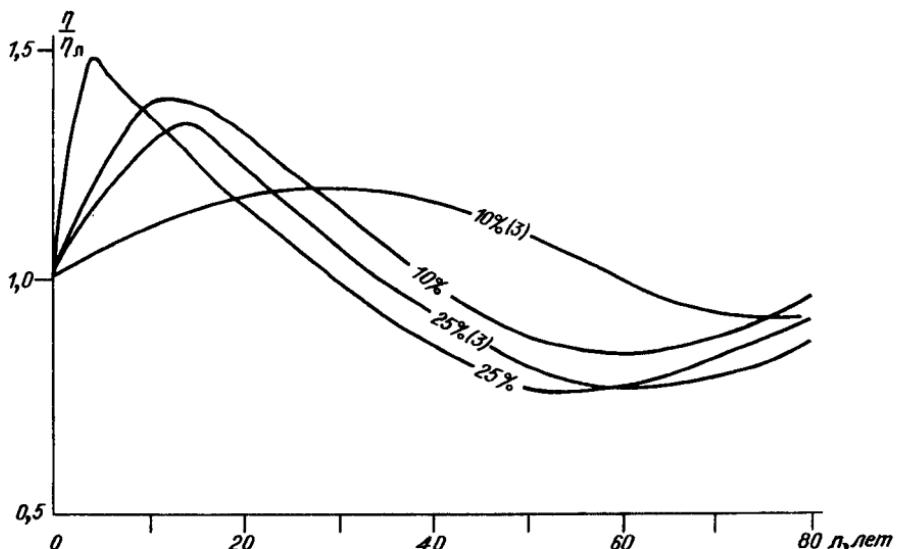


Рис. 3. З. Изменение коэффициента годового стока  $C$  с водосбора  $\eta$  в процессе проведения рубок леса, нормированного на соответствующую величину для незатронутого рубками водосбора  $\eta_0$  при ежегодной вырубке 10 и 25 % площади и в случае перерывов между рубками в 3 года (3).

отношению к свежей вырубке радиационный баланс леса в июне и июле выше на 10 %, в августе и сентябре — на 30 %. Такие соотношения отмечаются для вырубок значительного размера (с углом закрытости менее 10°). Суточные суммы радиационного баланса существенно зависят от размера вырубки и в меньшей степени — от типа леса.

Большая часть радиационного баланса идет на затраты тепла на испарение. Соотношение испарения с леса и вырубок рассмотрено выше. Другой значительной составляющей радиационного баланса является турбулентный теплообмен. Суточный ход турбулентного теплообмена аналогичен суточному ходу радиационного баланса. Сами же величины могут достигать в отдельные периоды 65 % от значений радиационного баланса леса. На вырубках турбулентный теплообмен составляет в среднем 20—30 % от радиационного баланса, что несколько больше, чем для полевых условий, где эта величина варьирует в пределах 10—30 %. С уменьшением размера вырубки турбулентный теплообмен ослабевает. На вырубке диаметром 50 м теплообмен в дневные часы в 3 раза меньше, чем на вырубке диаметром 300 м.

В первые годы после вырубки с развитием травостоя и ростом лесокультур резко увеличиваются затраты тепла на испарение, а турбулентный теплообмен уменьшается и затем изменяется слабо (примерно до 15-летнего возраста древостоя). В последующие годы до стадии спелого насаждения идет увеличение затрат тепла на испарение.

На изменение турбулентного теплообмена на вырубках влияют градиент температуры воздуха, который больше на свежих вырубках, и аэродинамическая шероховатость поверхности, которая увеличивается с ростом древостоя.

Результаты выполненных исследований показывают, что такие виды лесохозяйственной деятельности, как рубки леса и лесовозобновление, вызывают резкие изменения и перестройку водного, радиационного и теплового режима отдельных участков и малых водосборов, а при больших объемах хозяйственных работ — значительных территорий и крупных речных бассейнов.

### **3.3. ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА В СВЯЗИ СО СПЛОШНЫМИ РУБКАМИ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ**

Сплошные концентрированные рубки, широко применяемые в северотаежных лесах, вызывают значительные изменения основных компонентов лесных биогеоценозов: растительного и почвенного покровов, теплового и водного режимов. Некоторые вопросы этой проблемы освещены в работах А. А. Молчанова [1960], А. В. Побединского [1971], А. П. Клинцова [1971], В. В. Рахманова [1975], М. В. Рубцова, Н. Л. Братцевой [1977].

Работы выполнялись в подзоне северной тайги Архангельской области (Левашкое лесничество Обозерского лесхоза и Северодвинское лесничество Северодвинского лесхоза) в 1981—1985 гг. Исследовались такие элементы влагооборота, как осадки (жидкие и твердые), расходы на транспирацию и испарение, запасы влаги в почве. Суммарный сток рассчитывался как остаточный член уравнения водного баланса.

Объектами послужили вырубки ельника черничного свежего (наиболее распространенного типа леса в этом регионе) и производные древостои на разных этапах восстановления после сплошных концентрированных рубок. Таксационная характеристика пробных площадей дана в табл. 3.3.

Экспериментальные исследования включают комплекс метеорологических, гидрологических и лесоводственных наблюдений, которые проводились в соответствии с общепринятыми методиками [Руководство..., 1973]. Фитомасса древесного яруса определена методом модельных деревьев [Молчанов, Смирнов, 1967]. Для измерения испарения с поверхности почвы и напочвенного покрова применен метод испарителей, для измерения интенсивности транспирации — весовой (объемный) метод и метод быстрого взвешивания.

Атмосферные осадки, являясь основным источником влаги, поступающей в лесные биогеоценозы, определяют приходную часть водного баланса. Количество осадков, задерживаемых лесным пологом, зависит от состава, строения, возраста и густоты древостоев. Вопросы перераспределения жидких и твердых осадков северотаежными лесами рассматривались в работах В. Ф. Изотова [1967], В. А. Аникеевой с соавт. [1978, 1983], А. В. Волокитиной [1979], Э. П. Галенко [1983] и др.

Таблица 3.3

## Таксационные характеристики ельника и производных фитоценозов подзоны северной тайги

Тип леса	Древостой								Подрост		
	Высотный ярус	Состав	Возраст, лет	Средние		Число деревьев, шт./га	Сомкнутость крон	Общий запас, м <sup>3</sup> /га	Общее количество, шт./га	Состав	Средняя высота, м
				высота, м	диаметр, см						
Ельник черничный свежий (пл. 6)	I	8Е2Б ед.С	195	20,1	21,3	933	0,6	342,7	162	8Е2Б	1,9
Луговиковая вырубка 3-летняя (пл. 19)				Отсутствует					3500	40с2Б4Е	0,5—1,9
Березняк черничный свежий (пл. 20)	I	10Б	10	2,2	0,9	9425	0,49	—	19150	5Е5Б ед.Ос, С	0,4—0,9
Ельник черничный из предварительного подроста и тонкомеря (пл. 21)	I	8Е2Б ед. С	40—100	5,5	8,5	810	0,52	26,1	9300	7Б3Е, ед. С, Ос	0,5
Березняк черничный свежий (пл. 2)	I	7Б30с ед. С	30	6,0	3,8	18534	0,85	96,0	—	—	—
Березняк черничный свежий (пл. 2-а)	I	10Е	30	2,1	1,9	2267	0,4	—	8367	10Е ед. Б	0,8
	II	6Б40с ед. С	45	12,7	8,4	5167	0,76	230,0	—	—	—
	II	10Е	45	2,3	2,7	5100	0,42	7,2	4600	10Е	0,9
Березняк черничный свежий (пл. 3-а)	I	8Б1Е1С	100	21,1	21,5	611	0,82	249,1	—	—	—
	II	8Е2Б	100	10,6	11,8	1050	—	67,0	1216	10Е ед. Б, С	2,8
Ельник черничный свежий (пл. 1)	I	6Е4Б, ед. С, Ос	32—180	7,3	8,5	1958	0,82	62,3	1400	8Е2Б+С	0,7

Таблица 3.4

Задержание осадков лесными фитоценозами (средние данные за 1982—1985 гг.)

Фитоценозы	Воз- раст, класс	Период		Фитоценозы	Воз- раст, класс	Период	
		Теплый	Холод- ный			Теплый	Холод- ный
Ельник (пл. 6)	—	87/38	40/22	Двухъярусные бе- резняки	I	17/7	7/4
Елово-березовые одноярусные	I III	35/16 51/22	15/8 29/16		V X	55/24 80/35	15/8 38/21

Причина. Для теплого периода приведены данные за 1982—1984 гг. В числителе — в мм, в знаменателе — в % от осадков.

Исследования показали, что вырубка елового леса увеличивает на 37—38 % поступление жидких осадков к поверхности почвы (табл. 3.4). По мере восстановления древесной растительности на вырубках часть осадков перехватывается кронами деревьев и испаряется в атмосферу. Причем через 10 лет после рубки эта величина в зависимости от структуры молодняков составляет 7—16 %. В молодняках, формирующихся с участием сохраненного подроста и тонкомера ели (пробная площадка 21), весенний ярус задерживает 15—16 % выпадающих осадков, существенно уменьшая по сравнению с открытым местом количество осадков, достигающих поверхности почвы. При формировании молодняков за счет последующего возобновления (пл. 20) перехват осадков в этом же возрасте в 2 раза меньше (7—8 %). Разница в количестве осадков на открытом месте и в таких молодняках незначительна. В производных фитоценозах III—X класса возраста осадки значимо отличаются от их количества на открытом месте при любых дождях (от 2 до 18 мм). Задержание осадков пологом леса возрастает с увеличением возраста производных фитоценозов и в березняке X класса возраста не отличаются практически от ельника.

Наблюдения за задержанием твердых осадков показали, что максимальные снегозапасы накапливаются на лесных полянах и в молодых лиственных лесах, далее следуют большие открытые участки (вырубки, болота) и смешанные насаждения; минимальные снегозапасы — в еловых лесах (табл. 3.5).

Высота снежного покрова в период максимального снегонакопления во всех фитоценозах, кроме двухъярусного березняка I класса возраста, значимо отличается от этого показателя на лесной поляне. Различия в плотности снега несущественны. Запас воды к началу снеготаяния на 1—3-летних вырубках больше, чем в ельнике, на 21 мм, но меньше на 4—12 мм, чем в производных фитоценозах I—V класса возраста.

На сплошных концентрированных вырубках отмечается по сравнению с лесом более интенсивное испарение с поверхности снега. В марте 1985 г. в ясные дни интенсивность испарения с поверхности снега составляла 0,3 мм/сут. Кроме того, на вырубках наблюдается

Таблица 3.5

Характеристики снежного покрова  
(16—18. III. 1985 г.)

Фитоценозы	Класс возраста	Высота, см	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Поляна	—	68,2±0,8	0,19
Вырубка 3-летняя	—	59,0±1,0	0,20
Ельник черничный	—	44,3±0,6	0,20
Елово-березовые	I	61,7±0,7	0,20
одноярусные	III	54,9±0,7	0,20
Двухъярусные березняки	I	65,3±0,9	0,20
	V	60,9±0,5	0,20
	X	47,7±0,9	0,20

перенос снега ветром. Березовые и елово-березовые фитоценозы не препятствуют проникновению снега, так как еловый ярус сравнительно небольшой высоты (0,4—2,3 м в березняках I—V класса возраста) и не оказывает еще заметного влияния на снегонакопление. С увеличением возраста в производных биогеоценозах увеличивается масса крон ели и задержание ими твердых осадков падает. Снегозапасы в березняке X класса возраста не отличаются существенно от таковых в ельнике (см. табл. 3.5). Рассматриваемые фитоценозы в зависимости от состава, строения и возраста древостоя задерживают от 4 до 22 % зимних осадков. Перехват жидких осадков больше и составляет 7—38 %.

В результате вырубки древостоя резко изменяются и другие характеристики среды. Поступление суммарной радиации к поверхности почвы увеличивается почти в 10 раз, осадков — на 38 %, среднедневная температура воздуха повышается на 1—2 °С, температура почвы — на 3—8 °С, влагозапасы в почве увеличиваются на 45—50 мм, относительная влажность воздуха уменьшается на 3—10 %, значительно возрастает скорость ветра. На 50—80 % площади вырубок нарушается строение почвенного покрова. Следствием изменившихся условий среды на вырубках является увеличение в 2—3 раза интенсивности испарения с поверхности почвы и напочвенного покрова (табл. 3.6).

На 1—3-летних вырубках испаряющая поверхность представлена напочвенным покровом, характерным для вырубленного ельника (зеленые мхи, кустарнички, лесное разнотравье), и растениями, типичными для вырубок (луговик извилистый, иван-чай, золотая роза), а также минерализованными участками почвы, лишенной лесной подстилки и живой растительности (волоки, погрузочные площадки). Наиболее интенсивно испаряет влагу (0,16 мм/ч) почва, лишенная лесной подстилки. С поверхности почвы, покрытой зелеными мхами и луговиком извилистым, испарение идет медленнее. На вырубке поверхность почвы, покрытая зелеными мхами, испаряет влагу в 2 раза интенсивнее, чем под пологом леса.

По мере восстановления древесной растительности испарение с поверхности почвы уменьшается. Однако соотношение интенсивности испарения разными испаряющими поверхностями в течение первого десятилетия не изменяется. Так, в березняке I класса возраста с сомкнутостью крон 0,5 наиболее интенсивно (0,11 мм/ч) испарение идет по-прежнему с минерализованных участков, лишен-

Таблица 3.6

Среднедневная интенсивность испарения с поверхности почвы в ельнике и производных биогеоценозах, мм/ч

Фитоценоз	Класс воз-раста	Испаряющая поверхность				Средняя для фитоценоза	
		Зеленые мхи	Под-стилка	Луговик извилистый	Минерали-зованная почва	мм/ч	% от испарения в ельнике
Ельник Вырубки 1—3-летние	—	0,05	0,03	—	—	0,04	100
	—	0,11	—	0,11	0,16	0,11	258
	I	0,07	—	0,08	0,11	0,08	188
	V	0,04	0,04	—	—	0,04	98
Березняк	X	0,05	0,03	—	—	0,04	100

ных древесной и травяно-моховой растительности. Меньше испаряют участки с преобладанием луговика извилистого и зеленых мхов. В двухъярусном березняке V класса возраста с сомкнутостью крон I яруса 0,8 и II — 0,4 не обнаружено заметных различий в интенсивности испарения различными испаряющими поверхностями.

Таким образом, несмотря на биологические особенности разных представителей травяно-мохового яруса, больших различий в расходовании ими влаги на испарение не наблюдается как при произрастании под пологом леса, так и на вырубках. Такой же вывод сделан В. В. Протопоповым [1975] по результатам наблюдений под пологом леса и на вырубке в Вологодской области и в Сибири.

В среднем за вегетационный период (май—сентябрь) испарение с почвы в ельнике и березняке X класса возраста составляет 70—71 мм, на 1—3-летних вырубках — 191 мм, в березняках I класса возраста — 169—175 мм и минимальное испарение с поверхности почвы — 54—57 мм — в фитоценозах III—V класса возраста.

Расход почвы на транспирацию — одна из важных статей влагооборота в лесных фитоценозах. При расчетах транспирационных расходов использовали показатель транспирирующей фитомассы и среднесуточную интенсивность транспирации, которая колебалась в зависимости от погодных условий и периода вегетации у ели от 36 до 5, и у березы от 200 до 50 мг/г сырого вещества в час. Транспирационный расход в ельнике составил 137 мм, на 3-летней вырубке — 8, в березняках I, III, V, X класса возраста соответственно 28, 202, 314 и 187 мм, в елово-березовых фитоценозах I—III класса возраста — 95 и 255 мм. Близкие показатели расходов на транспирацию получены С. Ф. Федоровым [1977], А. Н. Антиповым и Н. Д. Антиповой [1980], Л. Н. Козловой [1980].

Полученные экспериментальные данные о составляющих водного баланса позволили сделать расчет баланса влаги за год в ельнике, на 3-летней вырубке и в производных березовых и елово-березовых фитоценозах (табл. 3.7). При расчете баланса влаги использована годовая сумма осадков, исправленная поправками на смачивание осадкомерного ведра и ветровой недоучет. Твердые осадки (с ноября по апрель) составляют 37, жидкие — 63 %.

Таблица 3.7

Средний (за 1982—1984 гг.) годовой баланс влаги в ельнике и производных фитоценозах

Фитоценоз	Класс воз-раста	Приход (осадки $\pm \Delta W$ ), мм	Расход				
			Испаре- ние с крон задержан- ных осад- ков	Транс- пирация	Испаре- ние с на- почвен- ного покрова и почвы	Сум- марное испаре- ние	Сток
Ельник	X	684—2=682	218 32	137 20	71 10	426 62	256 38
Вырубка 3-летняя	—	684—11=673	27 * 4	8 1	191 28	226 33	447 67
Елово-березовый молодняк	I	684—5=679	89 13	95 14	169 25	353 52	326 48
Елово-березовый древостой	III	684—4=680	135 20	255 38	57 8	447 66	233 34
Березняк	I	684—12=672	42 6	28 4	175 26	245 36	427 64
Березняк	III	684—8=676	86 13	202 30	65 10	353 52	323 48
	V	684—2=682	126 18	314 46	54 8	494 72	188 28
	X	684—7=677	202 30	187 28	70 10	459 68	218 32

Примечание.  $\Delta W$  — разница влагозапасов в почве. Звездочкой отмечено испарение с поверхности снега. Для составляющих расхода: в числителе — в мм, в знаменателе — в % от суммы осадков.

В ельнике половина поступающих осадков расходуется на транспирацию и испарение с крон. Испарение с напочвенного покрова и почвы составляет 10 %, суммарный сток в ельнике — 256 мм.

В результате вырубки древостоя происходит резкое изменение составляющих водного баланса. Сокращаются до минимума расходы на транспирацию и возрастают (до 28 %) расходы на испарение с напочвенного покрова и почвы. За счет увеличения количества осадков и уменьшения в целом суммарного испарения на вырубках годовой сток возрастает до 447 мм. Большую его часть составляет поверхностный сток, поскольку в первые 1—3 года после рубки наблюдаются повышенное и избыточное увлажнение почв вырубок и уменьшение их водопроницаемости вследствие уплотнения в процессе лесозаготовок.

В случае уничтожения при лесозаготовках подроста и формирования молодняков за счет последующего возобновления к концу первого десятилетия суммарное испарение и годовой сток мало отличаются от таковых на 1—3-летних вырубках (см. табл. 3.7, пл. 20).

При сохранении подроста предварительного происхождения и формировании смешанных елово-березовых фитоценозов через 10 лет после рубки общий сток снижается до 326 мм, а через 30 лет станов-

вится меньше (на 23 мм), чем в ельнике. Это дает основание заключить, что водорегулирующие свойства леса при сохранении 2—2,5 тыс. шт./га предварительного подроста и тонкомеря ели восстанавливаются в третьем десятилетии после рубки. По исследованиям в Калининской и Новгородской областях [Федоров, Марунич, 1979] на вырубке 22-летнего возраста с растущим сосновым насаждением сток был такой же, как и в спелом лесу.

При формировании молодняков из последующего возобновления через 30 лет после рубки общий сток и суммарное испарение не достигают значений, характерных для ельника, т. е. водорегулирующие свойства сравнительно с ельником еще не восстановились. Через 45 лет после рубки наблюдаются наибольшие (494 мм) расходы влаги на суммарное испарение и наименьший (188 мм) общий сток. В березняке X класса возраста расходы на суммарное испарение уменьшаются, общий сток несколько увеличивается.

Полученные показатели общего годового стока в ельнике, на вырубках и в производных лесах использовали для расчета (с учетом доли этих категорий в лесопокрытой площади) общего стока водосборов в районе работ. Общий сток составил около 300 мм, что согласуется со среднегодовым речным стоком (300—350 мм) с водосборов северотаежных лесов.

#### 3.4. ВОДОРЕГУЛИРУЮЩАЯ И ВОДООХРАННАЯ РОЛЬ НАРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ЛЕСОВ

Несоответствующие горным условиям методы ведения хозяйства, особенно способы и размеры рубок главного пользования, нередко снижают защитные функции лесов, интенсифицируют неблагоприятные стихийные явления. Участившиеся в последние десятилетия в Карпатах разрушительные паводки, сели и эрозия почв многие исследователи [Горшенин, 1959; Перехрест и др., 1971; Смаглюк, 1978] связывают с чрезмерными рубками и хозяйственным преобразованием лесов. Поэтому совершенствование рубок главного пользования с целью сохранения водоохранно-защитных свойств горных лесов является весьма актуальной задачей.

Исследования влияния рубок леса и последующего лесовосстановления на водоохранно-защитную роль еловых лесов Карпат проводятся на гидростационаре «Хрипелев» (см. разд. 2.3). В качестве основного метода исследований нами был принят активный эксперимент, суть которого заключалась в многолетнем изучении особенностей формирования стока и других составляющих водного баланса до и после рубок на водосборных площадях. В 1961—1973 гг. проведено изучение естественных гидрологических характеристик (калибровка) водосборов \*. В 1974 г. на водосборе № 3 проведена сплошнолесосечная рубка леса на площади 14,1 га, снизившая его лесистость с 84,4 до 29,6 %. После проведения рубки здесь сформированы смешанные хвойные культуры. В 1982 г. на водосборе № 1

\* Исследования проводились О. В. Чубатым и Л. А. Уваровым.

Таблица 3.8

## Физические характеристики верхнего 10-сантиметрового слоя почв в лесу и на вырубке

Место наблюдений	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скважность, %	Водопроницаемость, мм/мин
Спелый еловый лес	0,67—0,80	67—73	9,2—35,0
Вырубка с неповрежденной поверхностью	0,72—0,82	67—70	2,8—7,9
с поврежденной поверхностью	0,82—1,25	65—50	0,05—2,6

проведена добровольно-выборочная рубка средней интенсивности, в результате чего полнота древостоя снизилась до 0,6—0,7. Трелевка древесины с разрабатываемых лесосек проводилась в основном тракторами. На водосборе № 2 рубки леса не проводились, он служит контролем.

Рубки леса существенно изменили водный режим горных склонов. В значительной мере это связано с изменением составляющих суммарного испарения. Так, после рубок еловых древостоев, которые способны задерживать своим пологом в среднем 25 % годовой суммы осадков (около 300 мм), происходит полное проникновение атмосферной влаги к поверхности почвы. Одновременно снижаются расходы влаги на транспирацию, которая, по сведениям И. С. Шпака [1968], для еловых насаждений Карпат составляет 27 % годовых осадков (288 мм). Физическое испарение с поверхности почвы и напочвенного покрова после рубок, наоборот, возрастает. Исследования, проведенные в теплые сезоны 1974 и 1975 гг., показали, что в лесу физическое испарение составляло соответственно 119 и 139 мм, а на свежей вырубке — 285 и 339 мм (в 2,4 раза больше). Однако увеличение этой составляющей водного баланса не достигает значения расхода влаги лесом на суммарное испарение.

Сплошнолесосечные рубки леса сказываются и на почвенно-гидрологических условиях. Под их влиянием несколько ухудшаются физические свойства почв, особенно в их приповерхностной части (табл. 3.8). Наиболее резко изменяются эти свойства почв на участках вырубки с поврежденной при трелевке поверхностью. Такие участки составляют около 10 % площади вырубки на водосборе № 3. Здесь плотность почв возрастает в 1,2—1,6 раза, а водопроницаемость снижается в десятки и сотни раз. Уплотнение почвы и резкое снижение инфильтрации на поврежденных участках вырубки, особенно на тракторных волоках, обусловливает возникновение во время дождей поверхностного стока. На участках вырубки, где не проводилась трелевка, физические свойства почв изменяются значительно меньше. По сравнению с лесом водопроницаемость здесь меньше лишь в 2—3 раза и, составляя 3—8 мм/мин, остается тем не менее выше интенсивности выпадения дождей.

После сплошной рубки вследствие выпадения атмосферных осадков возрастают влагозапасы почвы (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Запасы влаги 60-сантиметрового слоя почвы в лесу и на вырубке, мм

Место наблюдений	Апрель	Июнь	Август	Октябрь
<i>Нижняя часть склона (средние за 1974—1984 гг.)</i>				
Спелый еловый лес	177	178	173	169
Вырубка	216	215	203	201
<i>Верхняя часть склона (средние за 1976—1984 гг.)</i>				
Спелый еловый лес	214	204	203	205
Вырубка	240	234	225	223

В связи с тем что в лесу и на вырубке неодинаково увлажняются почвы, уровни верховодки также различны. Наблюдения показали, что в дождливые периоды внутрипочвенные воды в лесу залегают на глубинах ниже 80—90 см, т. е. в оглеенных слоях почвогрунта, а на вырубке их уровень поднимается до глубины 40—60 см.

Промерзание почв на вырубке более глубокое и продолжительное, чем в лесу. Максимальная глубина промерзания почв вырубки по годам колеблется от 4 до 28 см. Длительность промерзания здесь в среднем 81 день. В лесу в связи с теплоизоляционным влиянием подстилки и древесного полога эти показатели меньше и составляют 2—25 см и 53 дня, причем в отдельные зимы промерзание не всегда бывает сплошным. Обычно к началу снеготаяния почвы в лесу находятся в талом состоянии, на вырубке они оттаивают во время снеготаяния или же после схода снега.

Все эти изменения существенным образом влияют на объем и режим стока. В табл. 3.10 приводятся данные о суммарном, грунтовом и поверхностном стоке на водосборах № 2 (контрольном) и № 3 (экспериментальном) до и после проведения сплошной рубки. За 12-летний период калибровки водосборов, т. е. до проведения рубки, показатели стока, формирующегося на контрольном и предназначенном в сплошную рубку водосборах, были очень близки. Так, среднемноголетние различия для суммарного стока составляли всего 12 %. Коэффициент корреляции между объемами годового стока водосборов за этот период достигал 0,92. Это свидетельствует об идентичности формирования стока на подобранных водосборах, покрытых лесом.

После проведения сплошной рубки на водосборе № 3 суммарный сток увеличился как по отношению к стоку с водосбора № 2, так и к стоку, формировавшемуся в период до проведения рубки. За период калибровки водосборов соотношение суммарного стока с экспериментального и контрольного водосборов составляло 0,90, а после рубки — 1,30. В результате сплошной рубки леса годовой суммарный сток возрос в среднем на 40 %, или 223 мм. Полученные результаты согласуются с выводами ряда исследователей об увеличении стока на малых водосборах после рубок леса [Львович, 1963; Чубатый, 1972,

Таблица 3.10

Сток на контрольном (числитель) и экспериментальном (знаменатель) водосборах до и после проведения сплошнолесосечной рубки, мм

Гидрологический год	Осадки, мм	Грунтовый	Паводковый	Суммарный	Коэффициент
<i>До рубки</i>					
1961—1973	1215	302/280	360/332	622/557	0,51/0,46
<i>После рубки</i>					
1974/75	1217	270/283	243/410	513/693	0,42/0,57
1975/76	1240	245/236	291/493	536/729	0,43/0,59
1976/77	1272	240/296	281/380	521/676	0,41/0,53
1977/78	1156	216/271	246/336	462/607	0,40/0,53
1978/79	923	208/228	140/217	348/445	0,38/0,48
1979/80	1430	249/274	379/580	628/854	0,44/0,60
1980/81	1035	217/212	241/327	458/539	0,44/0,52
1981/82	1164	194/184	370/523	564/707	0,48/0,61
1982/83	1180	200/218	198/296	398/514	0,34/0,44
1983/84	899	161/165	118/176	279/341	0,31/0,38
1984/85	1111	182/195	220/308	402/503	0,36/0,46
Средние...	1148	216/233	248/368	464/601	0,40/0,52

1984а, б; Молчанов, 1973; Мельчанов, 1978; Побединский, 1979]. Следует отметить, что вырубки нельзя рассматривать как площадь, аналогичную безлесным угодьям. Несмотря на то что на ней отсутствует древостой, ее почвы остаются лесными и в определенной мере сохраняют свои гидрологические свойства. Поэтому после рубок складывается новый, более динамичный тип влагооборота, отличающийся как от влагооборота в лесу, так и на сельскохозяйственных угодьях. Это непосредственно влияет и на генезис руслового суммарного стока.

Увеличение суммарного стока происходит в основном за счет поверхностного, паводкового стока, возросшего в среднем на 56 %. Одновременно имеет место и небольшое изменение грунтового стока — он возрос на 15 %. Некоторое его увеличение объясняется тем, что почвы на неэродированных участках вырубки обладают водопроницаемостью, превышающей интенсивность выпадения дождей и таяния снега. Поэтому возросшее увлажнение почв после рубки влечет за собой изменение грунтового стока. Но поскольку почвы вырубки не в состоянии перевести в грунтовый сток всю прибавку осадков, то значительно возрастает поверхностный паводковый сток. Важную роль в его интенсификации играют ухудшение физических и инфильтрационных свойств почв в местах трелевки древесины, длительное промерзание в холодный сезон и повышенное содержание в них влаги в теплый сезон.

Наряду с увеличением объема паводков после рубки леса наблюдается и более интенсивное их прохождение. Максимальные мгновенные модули стока на вырубке могут быть в 2—3 раза больше, чем

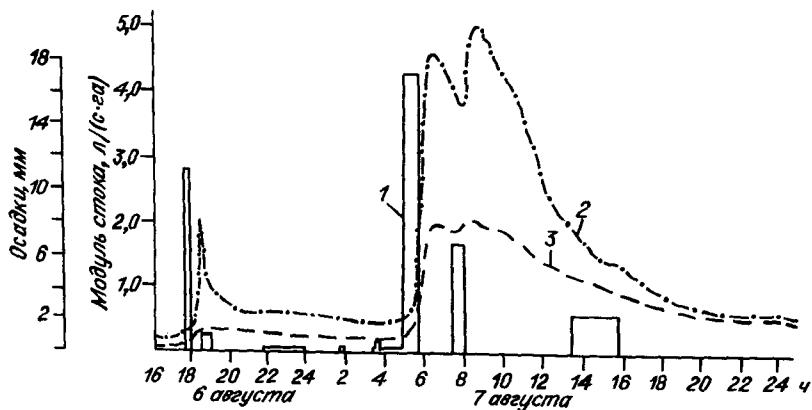


Рис. 3.4. Динамика осадков и стока во время паводка 6—7. VIII 1975 г.

1 — выпадение осадков; 2 — ход стока на водосборе № 3 (вырубка); 3 — то же, на контрольном водосборе № 2.

в лесу. Как видно из рис. 3.4, на лесопокрытом водосборе паводковый сток характеризуется равномерным подъемом и почти линейным спадом, а на обезлесенном водосборе гидрограф стока имеет резкий подъем и столь же резкий спад.

После рубки возрастает интенсивность прохождения весеннего половодья (рис. 3.5). На водосборе, пройденном рубкой, среднесуточные максимальные модули стока в 1,5—2 раза больше, чем на лесопокрытом, а максимальные мгновенные модули стока соответственно больше в 1,7—2,6 раза. Увеличение объемов и интенсивности прохождения стока весеннего половодья после рубки вызвано тем, что на вырубке из-за отсутствия древесного полога формируются снегозапасы почти в 2 раза большие, чем в лесу. Интенсивность весеннего снеготаяния на вырубке также в 2 раза выше. Кроме этого, увеличению стока с обезлесенного водосбора благоприятствует то, что в период снеготаяния почвы здесь находятся в мерзлом состоянии.

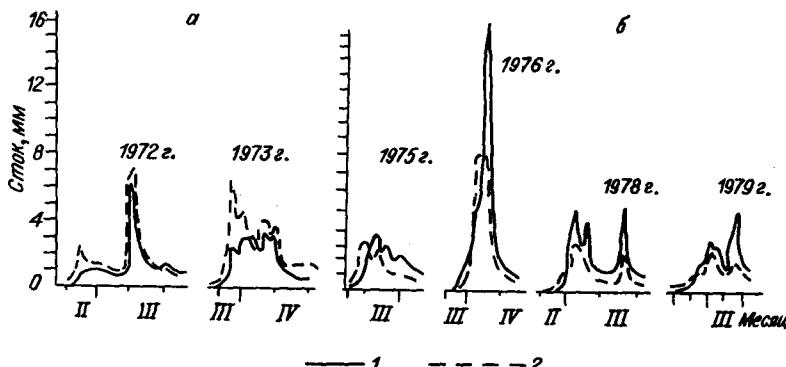


Рис. 3.5. Динамика стока весеннего половодья до (а) и после (б) рубки леса.

1 — водосбор № 3; 2 — контрольный водосбор № 2.

Для более полной характеристики изменения режима стока, вызванного рубкой, отметим, что в течение года на обезлесенном водосборе он не всегда бывает больше, чем на лесопокрытом. В зимнюю межень отдельных лет водотоки вырубки покрываются льдом или промерзают, чего почти не наблюдается в лесу. В такие периоды слой стока на обезлесенном водосборе может быть в 1,5 раза, а минимальные модули стока в 2,9—5,5 раза меньше, чем на лесопокрытом.

Под влиянием добровольно-выборочной рубки изменения стока несущественные. В количественном отношении они почти не выходят за пределы точности определения гидрологических параметров. Так, в первые два года после проведения этой рубки на водосборе № 1 суммарный сток возрос всего на 5 %, грунтовая его составляющая — на 2 и поверхностная — на 6 %. Эти изменения стока в 8—9 раз меньше, чем изменения, вызванные сплошнолесосечной рубкой. Связано это с тем, что после добровольно-выборочных рубок основная часть деревьев остается на корню, а следовательно, мало изменяется поступление осадков к почве, а также ее водные и физические свойства.

Неодинаковое изменение стока под влиянием разных способов рубок наблюдается и в буковых лесах Карпат. Так, по сведениям О. В. Чубатого [1984а, б], в результате сплошнолесосечной рубки суммарный годовой сток с водосборной площади увеличился за 10-летний период в среднем на 43 %, а его поверхностная составляющая — на 139 %. Под влиянием двухприемной равномерно-постепенной рубки суммарный годовой сток за такой же период возрос в среднем на 34 %, а поверхностный — на 58 %, в том числе после первого приема рубки (за 8 лет) последний увеличился на 40 %. Судя по этим данным, в буковых лесах суммарный сток в результате постепенных рубок изменяется в 1,3 раза меньше, чем под влиянием сплошных, а поверхностный — соответственно меньше в 2,2 раза.

Таким образом, в горных условиях Карпат наиболее резко трансформируют режим стока сплошнолесосечные, менее значимые равномерно-постепенные и добровольно-выборочные рубки.

Известный интерес представляет вопрос о влиянии лесовозобновления на формирование стока. Согласно исследованиям О. В. Чубатого [1984а, б], в буковых лесах Карпат после проведения сплошной рубки норма поверхностного стока восстановилась по истечении 10-летнего периода, когда образовался высокосомкнутый молодняк. Однако в дальнейшем имело место уменьшение грунтового стока.

В условиях стационара «Хрипелев» по мере зарастания сплошной вырубки травянистой и кустарниковой растительностью и последующего формирования нового поколения леса происходит уменьшение прибавки стока, вызванного рубкой. Так, в первые два года после ее проведения (этап свежей вырубки) суммарный сток с экспериментального водосбора № 3 превышал сток с контрольного № 2 на 35—36 %, а через 8—11 лет (этап смыкания лесных культур) — на 22—29 %. Связь между возрастом вырубки и прибавкой стока по годам за 11-летний период наблюдений после рубки оценивается

коэффициентом корреляции, равным  $0,68 \pm 0,16$ . Уменьшение суммарного стока происходит за счет уменьшения объемов небольших летних паводков. В первые годы после рубки на обезлесенном водосборе их объемы были больше на 11—177 %, чем на лесопокрытом, а в последующие — на 4—90 %. Вместе с тем прибавка годового стока, вызванная рубкой, уменьшается по годам весьма медленно — в среднем на 1,2 %. Учитывая существенное увеличение стока после рубки и весьма медленное его снижение в последующем, можно предполагать, что восстановление водорегулирующих свойств леса в данных условиях затягивается на несколько десятилетий. Таким образом, в Карпатах под влиянием вырубки леса возрастает суммарный сток за счет резко увеличившейся поверхностной, паводковой составляющей. В результате рубки увеличиваются объемы и интенсивность прохождения летних паводков и весеннего половодья. Уменьшение стока после рубки имеет место только во время отдельных зимних меженных периодов. С увеличением возраста вырубки и развитием нового поколения леса появляется тенденция к восстановлению водорегулирования.

## Глава 4

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ В ПРАКТИКЕ

Современный период развития гидрологической науки настоятельно требует переноса внимания специалистов в область практического использования результатов исследований. Недостатком многих работ по проблемам лесной гидрологии и раньше, и на современном этапе является определенная оторванность теоретических и методических проработок от конкретных социальных задач. Это приводит к слабой обоснованности многих проектов, связанных с использованием гидрологических свойств лесов. Следует напомнить, что уже первые исследования В. В. Докучаева, Г. Н. Высоцкого и других были ориентированы на решение конкретных проблем практики. Именно ими и было заложено практическое направление в лесной гидрологии.

Гидрологические свойства леса весьма многогранны. Но главным их преимуществом является возможность комплексного воздействия на окружающую среду. Как показано в гл. 2—3, лес обладает многими водоохранными, водорегулирующими, средообразующими и другими качествами. Причем каждый тип лесных геосистем в зависимости от набора показателей и принадлежности к природным системам более высокого ранга имеет специфический характер взаимодействия с гидрологическими процессами. Создание оптимальной структуры геосистем относительно ее гидрологических свойств — это реальный путь к управлению последними. В данной главе обсуждаются лишь некоторые примеры такого управления: возобновление ресурсов подземных вод с помощью леса, создание лесных полос в аридных условиях.

#### 4.1. ПОПОЛНЕНИЕ ЗАПАСОВ АРТЕЗИАНСКИХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ЛЕСОВ

Речной сток представляет главную и постоянно возобновляющуюся часть водных ресурсов всех континентов. Однако во многих странах, особенно с аридным климатом, важное значение в жизни людей имеет вода, добываемая из подземных, обычно артезианских, водных бассейнов. Она поддерживает существование не только ограниченных базисов в пустынях, но и больших сельскохозяйственных районов ряда стран. Земледелие в американских штатах Великих равнин достигло высокого уровня в значительной мере благодаря

существованию там обширного подземного бассейна («Алагавы»), воды которого интенсивно используются для орошения. Большие запасы подземных вод имеются в Сахаре и других пустынях мира. Известны значительные пресноводные бассейны в наших средне-азиатских республиках, где они часто располагаются над скоплениями соленых вод. Да и в зонах гумидного климата находится немало артезианских бассейнов с большими водными запасами. Ряд таких бассейнов расположен в европейской части СССР. Среди них особенно выделяется обширный Московский (Подмосковный) артезианский бассейн, занимающий центральные области страны и простирающийся далеко на северо-восток.

Все же как ни велики запасы артезианских вод на Земле, они сосредоточены в отдельных районах и сильно ограничены, а их пополнение за счет поверхностных вод происходит много медленнее, чем возобновление речных вод. Полагают, что важным источником восполнения подземных водоносных горизонтов являются реки. В частности, в Московском артезианском бассейне эту роль приписывают главным образом Волге, Оке, Москве-реке и Клязьме. Однако их долины и русла далеко не везде вскрывают водоносные слои бассейна, особенно если они залегают на большой глубине. К тому же в местах вскрытия таких слоев реки, с одной стороны, отдают в них воду, а с другой — дренируют и разгружают их. Поэтому эффект подпитывания водоносных слоев реками снижается, вследствие чего в местах интенсивного использования артезианских вод происходит сравнительно быстрое истощение их запасов.

Сказанное подтверждается многочисленными примерами. Так, в штате Техас в США, где подземные воды являются главным источником воды для орошения сельскохозяйственных культур и коммунального водоснабжения, большое ее потребление вызвало сильное истощение этих запасов, проявившееся в падении в последние десятилетия пьезометрического уровня более чем на 60 м. Аналогичное явление наблюдается во многих странах, в том числе и в СССР.

Главным источником подземного водоснабжения в пределах Московского артезианского бассейна служат водоносные слои карбона, которые эксплуатируются с помощью скважин уже более 100 лет. Число скважин непрерывно растет. В 1960 г. их насчитывалось 6 тыс., а к 1970 г. — около 13 тыс. Многолетняя откачка воды привела в местах крупных водозаборов к образованию депрессий в пьезометрической поверхности. Напорные уровни различных водоносных горизонтов упали в отдельных пунктах за период с 1959—1961 по 1969—1971 гг. на несколько десятков метров [Бочевер, Ковалева, 1978]. На эксплуатируемых участках подземных вод в районе г. Барановичи уровень одного из подземных горизонтов снизился в 1960-х гг. более чем на 12 м [Богомолов и др., 1978]. Известно о падении напора (и запасов) подземных вод в Донбассе и в других промышленных районах. Поэтому возникла необходимость искусственного восполнения подземных, главным образом артезианских, бассейнов с использованием поверхностных вод.

В настоящее время для этой цели в районах водозаборов при-

меняется преимущественно метод самотечной инфильтрации воды из русловых и наливных водохранилищ [Богомолов и др., 1978; Imhoff, 1982]. В некоторых местах стала применяться напорная инфильтрация речных и озерных вод при закачке их в скважины. Широкое применение агротехнических, лесомелиоративных и гидротехнических средств задержания поверхностного стока в речных бассейнах также является одним из путей пополнения запасов подземных вод. Однако подобные мероприятия в нашей стране осуществляются пока в небольших масштабах, что можно объяснить наличием больших запасов более доступных поверхностных вод, главным образом речных. Общая производительность искусственно пополняемых поверхностных вод в СССР составляла в 1970 г. только 2,6 % всех использованных для водоснабжения подземных вод [Богомолов и др., 1978]. В других странах искусственное подпитывание запасов подземных вод применяется значительно шире. Так, в двух крупных промышленных районах ФРГ — Северный Рейн-Вестфалия и Рур — создан ряд специальных водохранилищ, предназначенных для подпитывания грунтовых и более глубоких подземных вод поверхностными. Около 95 % всей питьевой воды в долине р. Рур добывается из подземных водоносных горизонтов, пополняемых из поверхностного стока [Imhoff, 1982].

Несомненно, все усиливающееся использование запасов артезианских вод для промышленно-бытовых целей в разных районах нашей страны, а также для обеспечения орошения и отгонного животноводства на обширных землях Средней Азии и Казахстана требует осуществления более широких мер, направленных на восполнение подземных водных ресурсов. Среди этих мер важную роль должно сыграть использование лесов как водоохранного и водорегулирующего фактора, способствующего сохранению большего количества выпавшей в виде осадков влаги и превращению ее в поверхностные и подземные водные ресурсы. Надо сказать, что если водоохранная роль лесов, т. е. их положительное влияние на общее количество вод в той или иной местности вызывает еще некоторые сомнения, то их водорегулирующая роль — способность к перераспределению стока, переводу части поверхностных вод в подземные и к выравниванию стока во времени — признается почти всеми специалистами. Эта способность проявляется в том, что леса благодаря мощным корневым системам и постоянному раскачиванию высоких деревьев увеличивают водопроницаемость почв и нижележащих материнских пород и тем самым усиливают инфильтрацию в них как снеговых талых, так и дождевых вод [Рахманов, 1975]. Если благодаря лесным полосам в системе агролесомелиоративных мероприятий в сельском хозяйстве, создающим благоприятный микроклимат на полях, можно лишь в небольшой мере восполнять подземные воды, причем главным образом их верхний горизонт — грунтовые воды, то для полного восполнения запасов глубоких вод в водоносных слоях артезианских бассейнов требуется сохранение и посадка новых массивных лесонасаждений, расположенных в областях питания этих бассейнов.

Как известно, артезианские бассейны представляют обычно си-

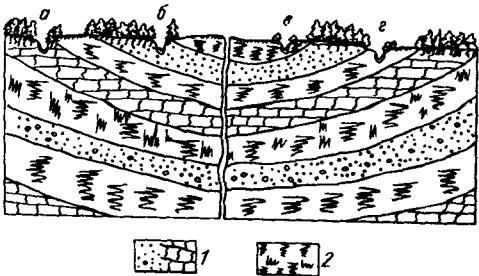


Рис. 4. 1. Схема размещения лесов в областях питания артезианских бассейнов.

1 — водоносные горизонты; 2 — водоупорные слои бассейнов; а, б — реки подпитывающие; в, г — реки, не подпитывающие водноносные горизонты.

ные слои образуют ложе и кровлю заключенных между ними проницаемых водоносных слоев, сложенных обычно трещиноватыми известняками и песчаниками, галечниками, гравием, песками, заполняемыми водой, находящейся под давлением кровли. Заполнение водоносных соев происходит в основном в областях питания, где они поднимаются близко к дневной поверхности и оказываются покрытыми лишь тонким слоем почв и четвертичных отложений. Произрастающие в таких местах леса пронизывают своими корнями как почвы, так и материнские породы, лежащие на выходах водоносных слоев, способствуют более быстрому просачиванию в эти слои воды от таяния снега и дождей и ускоряют пополнение ими различных ярусов артезианских вод. Поэтому посадка новых и улучшение уже произрастающих лесов в областях питания артезианских бассейнов следует рассматривать в качестве важного мероприятия по восполнению их водных запасов при усиленной их эксплуатации.

Лесные площади как места инфильтрации поверхностных вод в глубь грунтов обладают большим преимуществом перед наливными питающими бассейнами. Лесные почвы обычно не заливаются и не теряют своих фильтрационных свойств, даже при разливах затопляющих леса мутных вод, дающих большие отложения наносов. Леса способствуют инфильтрации очень большого количества осадков, в сущности, при любом рельефе, если почвы их не вытаптываются в результате пастьбы скота или частого посещения людей. Площадь лесных насаждений в области питания артезианских бассейнов может быть много больше зеркала наливных инфильтрационных питающих водохранилищ. Практически вся территория выходов на поверхность водоносных горизонтов, засаженная лесами, может рассматриваться как область эффективного питания соответствующего артезианского бассейна. Массивные леса в областях питания водоносных слоев артезианских бассейнов, обеспечивая более быстрый перевод поверхностных вод в глубь грунтов, создают условия для уменьшения их потерь на испарение благодаря особому микроклимату, обусловленному уменьшением скорости ветра, снижением температуры и повышением относительной влажности воздуха. Эти свойства лесов хорошо известны, однако их роль в питании артезианских бассейнов еще мало изучена. Требуются дополнительные доказательства того, что леса в областях питания артезианских бассейнов

действительно способствуют инфильтрации поверхностных вод в водоносные артезианские слои и пополнению их водных запасов.

В качестве таких доказательств могут быть использованы данные регулярных гидрологических наблюдений на небольших реках, протекающих в областях питания этих бассейнов. Резкое снижение водности рек в таких областях по сравнению с реками, протекающими вне областей со сходными природными характеристиками, может служить свидетельством того, что поверхностные воды речных водохранилищ расходуются на фильтрацию в легко проникаемые водоносные слои и пополняют водные запасы артезианских бассейнов. И если просачившаяся вглубь вода не выклинивается в нижнем течении реки в виде грунтовых вод, следовательно, она расходуется на питание водоносных слоев артезианских бассейнов, поднимающихся здесь близко к дневной поверхности.

Рассмотрим значения годового стока рек, протекающих на территории расположения западного, приподнятого к земной поверхности крыла Московского артезианского бассейна. Это крыло занимает западную часть Московской области и прилегающие к ней районы Смоленской, Калужской и Тульской областей. На этой территории к поверхности под слои четвертичных отложений, а местами непосредственно под почву, выходят шесть основных напорных водоносных горизонтов меловой, юрской и каменноугольной систем: клязьминский, касимовский, мячковско-подпольский, каширский, протвинско-окский и, самый нижний, утинский. Зоны их выходов располагаются неправильными концентрическими полукольцами к северо-западу, западу и юго-западу от г. Москвы [Бочевер, Ковалева, 1978]. Здесь находятся верхние части бассейнов Зап. Двины, Днепра, Москвы-реки, левых притоков р. Оки. Имеющаяся здесь относительно густая сеть гидрометрических створов позволяет рассматривать сток даже небольших рек.

Сопоставление объемов речного стока за год и другие периоды показывает, что они сильно различаются даже у соседних рек. Этот факт нельзя объяснить никакими другими причинами, кроме как безвозвратной инфильтрацией воды в основные водоносные горизонты Московского артезианского бассейна и в небольшие подземные водоносные слои четвертичного возраста, залегающие на водоупорных породах. Для сопоставления использованы данные гидрологических наблюдений за годы, когда безвозвратное изъятие воды из рек на орошение и другие хозяйственные нужды было невелико и на естественном стоке практически не отражалось. Так, согласно гидрологическим наблюдениям за 1957—1970 гг. годовой сток рек Межа и Обша, верхних левых притоков р. Зап. Двины равен 211 и 223 мм. Их бассейны площадью 5220 и 1590 км<sup>2</sup> расположены в области выходов протвинско-окского и утинского водоносных горизонтов, состоящих из известняков каменноугольного возраста. Сток же самой Зап. Двины в верховьях, у г. Зап. Двина, и ее третьего левого притока — р. Велеса, бассейны которых (площади 2180 и 870 км<sup>2</sup>) находятся лишь частично в области выходов утинского водоносного горизонта, равен в среднем за те же годы 244 и 247 мм. А сток р. То-

ропа, правого притока р. Зап. Двины, с бассейном (1480 км<sup>2</sup>), находящимся западнее области выходов обоих названных водоносных горизонтов, достигает 287 мм, превышая годовой сток рек Межа и Обша на 65—76 мм.

Лесистость всех речных бассейнов примерно одинаковая (55—60 %). Лишь в бассейнах рек Зап. Двина и Велеса она незначительно возрастает — до 67—70 %. Зависимость между годовым стоком и лесистостью всех этих рек не прослеживается. Годовая сумма осадков для большей части данного района равна примерно 600 мм, но увеличивается до 650 мм в области водораздела рек Зап. Двина, Волга и Днепр, где находятся бассейны рек Межа и Обша, характеризующиеся наименьшим годовым стоком. Значительное его снижение в этих реках, как и некоторое его уменьшение в реках Зап. Двина и Велеса по сравнению со стоком р. Торопа, можно объяснить только безвозвратным оттоком вод атмосферных осадков в проницаемые водоносные горизонты Московского артезианского бассейна.

В рассматриваемом районе некоторые другие реки также отличаются пониженным годовым стоком из-за более обильной фильтрации воды в водоносные артезианские слои. Так, средний за 1963—1970 гг. годовой сток р. Путынка, левого притока р. Угра, впадающей в р. Оку, равен 123 мм. Ее бассейн, облесенный на 44 %, находится в области выходов каширского водоносного горизонта. Соответствующий сток соседних рек — верховьев р. Угра, рек Ворь и Ресса с бассейнами, несколько менее облесенными, но находящимися за пределами основных выходов артезианских водоносных слоев, — достигает 194—208 мм, т. е. на 65 % больше стока р. Путынка. Несколько пониженный годовой сток наблюдается и у р. Протва с бассейном, находящимся частично в области питания противинско-окского водоносного горизонта.

Большая инфильтрация в утинский водоносный горизонт наблюдается в верховьях р. Днепра, в области выходов этого горизонта. Основанием для такого утверждения служит отмеченное нами ранее [Рахманов, 1975] существенное уменьшение здесь стока летне-осенней межени. В самом деле, по измерениям с июля по ноябрь среднемноголетний сток реки этого периода у самого верхнего створа — с. Большево (бассейн 258 км<sup>2</sup>) — равен только 4,5 мм, тогда как ниже, у пос. Надежда (бассейн 3640 км<sup>2</sup>), он возрастает до 14—15 мм, а у г. Дорогобуж (бассейн 6390 км<sup>2</sup>) достигает 30 мм. Бассейн р. Днепра ниже двух последних створов расположен западнее выходов утинского водоносного горизонта. Конечно, не исключено, что в данном случае на участке р. Днепра ниже с. Большево выклинивается часть воды, просачивающейся в грунт на верхнем участке. Однако простые расчеты показывают, что прирост меженного стока реки ниже с. Большево может быть объяснен подземным притоком воды сверху лишь частично. Основное увеличение меженного стока реки в двух нижних створах происходит благодаря меньшим потерям его на фильтрацию воды в водоносные артезианские горизонты.

Аналогичные явления резкого уменьшения годового стока рек в области питания артезианских водоносных горизонтов отмечены

на территории, занимаемой западным крылом Среднерусского артезианского бассейна, юго-западным продолжением Московского бассейна [Богомолов и др., 1978]. Так, среднегодовой сток р. Ресса, бассейн которой ( $125 \text{ км}^2$ ) расположен в области выходов водоносных горизонтов меловой толщи мезозоя, равен всего 169 мм и почти в 2 раза меньше стока соседней р. Друть (331 мм), протекающей за пределами выходов этих водоносных горизонтов.

Сходную картину можно наблюдать при анализе годового стока рек, протекающих на территории Брестского артезианского бассейна. Этот бассейн второго порядка является частью более обширного Подляйско-Брестского (Балтийско-Польского, по Г. В. Богомолову и др. [1978]) артезианского бассейна. Он представляет глубокую впадину, осадочные породы которой палеозойской и мезозойской систем, а также палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов насыщены водами, гидравлически связанными между собой. Сверху водоносная толща прикрыта суглинисто-песчаными отложениями, мощность которых местами уменьшается до 3 м.

Анализ данных гидрологических наблюдений на реках показывает, что в областях выходов водоносных горизонтов близко к поверхности земли, расположенных полукругом к востоку от г. Бреста, протекают реки с пониженной водностью. К ним можно отнести верховья р. Мухавец до г. Пружаны (бассейн  $105 \text{ км}^2$ ) и ее притоки — Жабинка ( $189 \text{ км}^2$ ) и Рыта ( $1600 \text{ км}^2$ ) — со среднегодовым стоком 85—93 мм, а также верховья р. Ясьельда, притока р. Припять, со стоком 105 мм. Сток же других рек — Лесная, Ружанка, Зельвянка, а также Мухавец и Ясьельда в их среднем и нижнем течении — достигает 160—170 мм. Их бассейны находятся большей частью вне выходов глубоких артезианских водоносных слоев.

Так как в этом районе физико-географические условия относительно однородны и не обнаруживается заметной зависимости речного стока от каких-либо других факторов, в первую очередь от лесистости и заболоченности, то и здесь уменьшение почти вдвое водности рек с бассейнами, находящимися в областях питания подземных водоносных слоев, можно рассматривать как доказательство безвозвратной фильтрации дождевых и талых снеговых вод в эти слои и пополнения ими водных запасов Брестского артезианского бассейна.

Проследим теперь изменения речного стока еще в одном районе европейской части СССР — в Заволжье, где во многих местах не глубоко под почвами залегают мощные отложения трещиноватых известняков преимущественно казанского яруса перми. Об этом можно судить по многочисленным карстовым провалам (воронкам), особенно часто встречающимся на облесенных участках речных бассейнов. Они являются свидетельством обильной инфильтрации поверхностных вод в подпочвенные известняки и их интенсивного выщелачивания. Из-за оттока этих вод вглубь водность ряда рек, текущих в р. Волгу с ее водораздела с р. Урал, в частности с возвышенного плато Общий Сырт, уменьшается вниз по течению. Об этом явлении в р. Сок сообщил В. М. Широков [1957].

Об аналогичном явлении на реках Марийской АССР известно из

работы А. К. Денисова [1975]. Действительно, трещиноватые известняки, подступающие к поверхности в Заволжье, поглощают много талых и дождевых вод и уменьшают водность рек. Этому в известной степени и препятствуют уплотненные почвенные слои и подпочвенные материнские породы. Но на облесенных участках водосборов с не-глубоким залеганием известняков, где почвы и подпочвенные слои сильно пронизываются корнями деревьев, происходит интенсивное просачивание поверхностных вод вглубь, вызывая снижение речного стока.

Сток р. Сок в верховьях, у ст. Сургут (бассейн 4730 км<sup>2</sup>), в среднем за 11 лет (с 1936 по 1938 г. и с 1947 по 1954 г.) равен 104 мм, а ниже, у пос. Гундоровка (бассейн 5960 км<sup>2</sup>), снижается до 84 мм. Это означает, что в нижней части бассейна, от ст. Сургут до пос. Гундоровка, на площади 1230 км<sup>2</sup>, он равен всего 7 мм. В сущности, здесь почти все поверхностные воды фильтруются в подземные трещиноватые известняки и расходуются на пополнение глубоких водоносных артезианских горизонтов. Не исключено, однако, что часть воды, просочившейся в известняки, выклинивается в глубоко врезанное русло р. Волги.

Можно было бы предположить, что некоторая доля воды из бассейна р. Сок перетекает подземным путем также в соседние реки, увеличивая их сток. Однако и в последних наблюдается то же явление: их водность падает от верховьев к низовьям. В соседней р. Кондурча, текущей в том же направлении с востока на запад севернее р. Сок, годовой сток в среднем за 1939—1950 гг. в верховьях, у с. Кошки (бассейн 2390 км<sup>2</sup>), равняется 93 мм, а ниже, у пос. Украинка (бассейн 2390 км<sup>2</sup>), он падает до 85 мм. Сток за 1963—1970 гг. в тех же створах соответственно равен 88 и 76 мм. Это значит, что в промежуточном бассейне между данными створами годовой сток составляет в первый упомянутый период лишь 72, а во второй только 58 мм.

В р. Бол. Кинель, бассейн которой расположен южнее бассейна р. Сок, сток в верховьях, у с. Азматово (бассейн 908 км<sup>2</sup>), за 1963—1970 гг. равен 115 мм, а ниже по течению, у пос. Тимашево (бассейн 12 тыс. км<sup>2</sup>), снижается до 91 мм. Еще южнее, в верховьях р. Самара, у пос. Новосергиевка (бассейн 1340 км<sup>2</sup>), сток за те же годы составляет в среднем 93 мм, а ниже, у пос. Елшанка (бассейн 22 тыс. км<sup>2</sup>), падает до 68 мм.

Как видно из приведенных данных, сток почти всех рек Заволжья уменьшается вниз по течению. Если бы водность этих рек зависела только от количества осадков и испарения в их бассейнах, то при движении вдоль них сверху вниз, от Общего Сырта на запад к р. Волге, она не уменьшалась бы, а, наоборот, увеличивалась, так как годовая сумма осадков в этом направлении возрастает, а испарение с бассейнов уменьшается. В действительности наблюдается обратное явление — падение водности в направлении с востока на запад, обусловленное большими потерями поверхностных вод на инфильтрацию в известняки, залегающими близко от почвенного покрова. Именно в этом районе находится южное приподнятое

крыло Волго-Камского артезианского бассейна и области питания его водоносных слоев. Они и подпитываются здесь благодаря талым снеговым и дождевым водам. Возможно, часть этих вод расходуется на подпитывание водоносных горизонтов Прикаспийского артезианского бассейна.

Все сказанное выше о восполнении артезианских вод за счет поверхностного стока подтверждается анализом данных гидрологических наблюдений на реках, протекающих в других районах страны, в том числе в областях питания Днепровского и Прибалтийского артезианских бассейнов. Отсюда следует важный вывод для гидрологов, занимающихся изучением водоохранной роли лесов методом установления корреляционных связей между годовым стоком рек и лесистостью бассейнов: в тех случаях, когда в каких-то районах такие связи не обнаруживаются или оказываются не очень тесными, необходимо изучить расположение в исследуемом районе областей питания артезианских бассейнов. Может оказаться, что водоохраные свойства лесов в нем не проявляются в увеличении стока рек из-за того, что значительная часть поверхностных вод, просачиваясь в лесах в водоносные слои артезианских бассейнов, не попадает в реки. В таком районе водоохранная роль лесов заключается не в увеличении водности рек, а в восполнении водных запасов артезианских бассейнов. Эта роль возрастает в случае опасности быстрого истощения артезианских вод. Чем большая опасность истощения этих вод возникает в том или ином хозяйственном районе, тем быстрее и шире должны проводиться мероприятия по охране и улучшению существующих и посадке новых лесов в областях питания водоносных слоев артезианских бассейнов.

В этом свете для предотвращения дальнейшего истощения водных запасов Московского артезианского бассейна или снижения его интенсивности представляется важным сохранять, а местами улучшать и расширять известные смоленские леса и леса Московской, Калининской, Калужской и Тульской областей. Их важное значение состоит и в том, что они, произрастая в областях водоразделов главнейших рек европейской части СССР — Волги, Днепра и Зап. Двины и их верхних притоков, способствуют поддержанию их водности. Улучшению питания девонских водоносных слоев Московского артезианского бассейна ~~способствовало бы создание новых лесных насаждений в Орловской области на территории Центрального девонского поля~~. Посадки и улучшение лесов на склонах гор Кавказа, Средней Азии, на нагорье Крымских Яйл, в Карпатах, Сибири, на Дальнем Востоке также явилось бы средством ускорения фильтрации воды от тающих снегов и дождей в глубь грунтов и обогащения водой водоносных слоев не только горных районов, но и соседних с ними равнинных территорий, в том числе пустынь. Эти леса, усиливая поступление поверхностных вод в глубокие подземные водоносные слои, играют, несомненно, важную водоохранную роль.

Что касается водорегулирующих функций лесов, произрастающих в областях питания артезианских бассейнов, то они заключаются в том, что леса, усиливая фильтрацию поверхностных вод в глубокие

водоносные горизонты, изымают их из звена сравнительно быстрого наземного влагооборота и переводят в звено несоизмеримо более медленного подземного влагооборота. Рост потребления воды артезианских бассейнов и ускорение их пополнения с помощью улучшения и посадки лесов в областях питания этих бассейнов приводят к более быстрому водному обмену и в звене подземного влагооборота.

## 4.2. ЛАНДШАФТНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДООХРАННЫХ ПОЛОС

В настоящее время необходимость ландшафтного обоснования проектов охраны природы и рационального природопользования нашла широкое признание. Охрану природы, организацию использования того или иного ресурса осуществляют всегда в условиях конкретной природной обстановки. Рациональное природопользование во многом определяется правильным территориальным размещением различных видов мелиоративных мероприятий. Их успех в значительной мере зависит от организации территории — первого звена мелиоративных работ, которое представляет собой, по сути, этап конструирования природно-хозяйственной управляемой системы.

Важной составной частью широкого комплекса водоохранно-водорегулирующих и противоэрозионных мероприятий являются прибрежные защитные мелиорации, выполняемые чаще всего в виде лесных насаждений. Защитные лесонасаждения признаны одним из наиболее эффективных и надежных средств охраны водных ресурсов. В отличие от агротехнических и гидротехнических лесомелиоративные мероприятия рассчитаны на длительный период времени, они оказывают разностороннее влияние на весь комплекс природных условий в пределах занятых площадей и на прилегающие территории [Харитонов, 1976] и поэтому должны рассматриваться как основные. Особенno велика роль мероприятий по мелиорации для решения проблемы малых водотоков. Однако, как показывает опыт, одни лесомелиоративные мероприятия не предотвращают разрушений полосных пространств [Швебс, 1985], а частая закладка лесополос уменьшает площадь пахотной земли. В условиях интенсивного стока они не могут полностью предотвратить формирование склоновых потоков. Это убеждает в том, что все действия, направленные на использование и охрану природных ресурсов, должны быть строго дифференцированы с учетом строения и функционирования природно-хозяйственных систем. Это положение можно реализовать при помощи почвозащитной системы контурно-мелиоративного земледелия (ПЗСКМЗ).

Сущность ее состоит в расчленении территории вдоль естественных границ с целью ослабления «лавинообразного эффекта» нарастания негативных явлений при формировании поверхностного стока. ПЗСКМЗ — это система обоснованно увязанных в пространстве и времени агротехнических, гидротехнических, лесомелиоративных и других мероприятий. Структура данной системы формируется контурной организацией всей территории, вписанной в строение природных ландшафтов. Назначение контурных полос — в регулировании

поверхностного стока и смыва почвы. Выделяются два последовательных и качественно различных уровня регулирования водноэрозионного процесса, выражющиеся в создании рубежей I и II порядка [Швебс, 1985]. При больших уклонах (более 3°), длинах склона более 500 м и особенно интенсивных ливневых осадках возможности агротехнических приемов ограничены, поэтому здесь проектируются небольшие валки, борозды. Задачи этого уровня (рубежей II порядка) — отвести воду. Надежность рубежей II порядка низкая, поэтому в особо опасных ландшафтно-геоморфологических условиях создаются рубежи I порядка. Принципиальное отличие этого уровня регулирования водноэрозионного процесса — изменение почти под 90° направления стока. Стокорегулирующие устройства вдоль рубежей I порядка рассчитываются так, чтобы исключить перелив и формирование лавинообразного стока вдоль склона при любых сколь угодно больших паводках. Достигается это такой конструкцией водорегулирующих устройств (например, вала-канавы), которая обеспечивает частичное задерживание воды и сброс ее при достижении определенного уровня. В соответствии с контурным размещением рубежей и гидротехнических сооружений создается система контурных лесополос.

Основой проектирования ПЗСКМЗ является ландшафтная карта. Последняя представляет собой картографическую модель природных систем и призвана отразить особенности их строения и в общих чертах — особенности функционирования. Основной ландшафтной единицей при обосновании и проектировании ПЗСКМЗ можно считать природный комплекс типа уроцища. При проектировании системы в первую очередь учитываются особенности склоново-террасовых парадинамических рядов ПТК, так как склоны являются основной территорией, на которой должна проводиться существенная реконструкция. Именно на склонах размещены лесные полосы, выполняющие водорегулирующую роль. Активным элементом ландшафтно-контурной системы использования земель вдоль гидрографической сети является прибрежная водоохранная зона (ПВЗ). Только как элемент ПЗСКМЗ водоохранные лесополосы будут создавать мелиоративный эффект. ПВЗ следует рассматривать как территорию высокой концентрации водоохранных мероприятий, которые представляют собой единый комплекс, тесно связанный с типом долинного парагенетического ландшафта (ПГЛ) и видом преобладающей хозяйственной деятельности.

Общая территориальная организация ПВЗ закрепляется системой лесных полос и гидротехническими устройствами. Между лесополосами располагаются сельскохозяйственные угодья, являющиеся элементами ПЗСКМЗ, поэтому технология земледелия на них и особенно их землеустройство должны быть подчинены основной функции ПВЗ. Под системой лесных полос понимается комплекс различного вида насаждений определенной конструкции, взаимодействующих между собой и создающих мелиоративный эффект в ПВЗ.

В общем случае в ПВЗ включаются берегозащитные и водорегулирующие лесные полосы, устраиваемые на ярко выраженных эле-

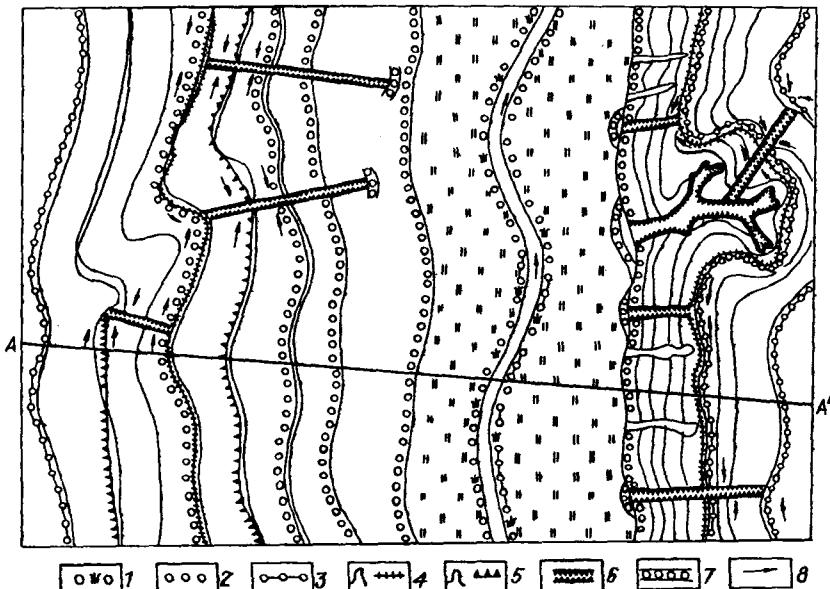


Рис. 4. 2. Принципиальная схема организации территории прибрежной водохранилищ зоны.

Лесные полосы: 1 — берегозащитные, 2 — водорегулирующие припойменные, притеррасные и склоновые; 3 — прибрежные; 4 — водорегулирующий вал с канавой; 5 — валик высотой 30—40 см, напашная терраса или другие водорегулирующие устройства; 6 — водоотводящая залуженная ложбина; 7 — илофильры; 8 — направление водного потока  $A-A'$  — профиль (см. рис. 4. 3.).

ментах речной долины: пойме, надпойменных террасах, склонах коренных берегов, на бровке и над бровкой коренных берегов.

Принципиальная схема ПВЗ приведена на рис. 4.2 и 4.3. Проектирование ПВЗ должно выполняться с учетом положения, что долина реки представляет собой парагенетический ландшафт [Швебс и др., 1982]. Долинный ПГЛ (как цельное образование) формируется сочетанием простых комплексов, «нанизанных» на русло. В едином по своим парагенетическим свойствам долинном комплексе имеются полосы — структурные ландшафтные образования в виде пойменно-речового и склоново-террасового рядов. Последний может быть также представлен для прикладных целей в виде структурных полос из однотипных простых уроцищ или подуроцищ, расположенных в пределах диапазона высот — парадинамические ряды ПТК (уроцищ). Выделение последних позволяет обосновать ландшафтно-контурную систему почвозащитного земледелия, согласно которому рабочие выделы можно расположить на участках склонов, имеющих один тип природных систем. Структура ПГЛ определяет основные цели и направления комплекса с мелиорацией в тех или иных речных долинах. Данное положение можно реализовать при помощи контурно-полосной организации территории, что приводит в соответствие сельхозугодья с границами естественных геокомплексов.

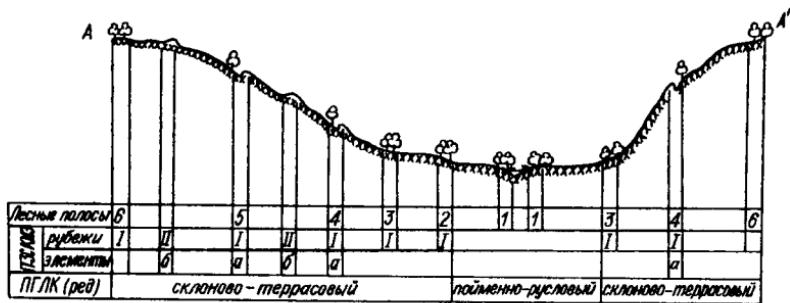


Рис. 4. 3. Профиль плана организации территории прибрежной водоохранной зоны (см. рис. 4. 2.). Усл. обозн. см. текст.

Таким образом, специфика речной долины будет определять структуру и границы ПВЗ. Для выражения цельности ПВЗ целесообразно выделяемую территорию именовать «массивом прибрежной водоохранной зоны», или для краткости — ПВЗ-массивом, а сам комплекс мероприятий — ПВЗ-мелиорацией. В состав ПВЗ-массива включаются пойма, надпойменные террасы и склоны долин, а также овраги, непосредственно примыкающие к ним. Такой подход придает особый статус не только пойменно-русловому ряду парагенетического ландшафтного комплекса (ПГЛК), но и всему долинному ПГЛ, в том числе той его части, которая расположена на примыкающем к пойме склоне.

Обоснование проекта ПВЗ-мелиорации должно исходить из строения долинного ПГЛ, его функционирования и особенностей региональной природно-хозяйственной системы. Строение ПГЛ раскрывается морфологическими признаками, а функционирование определяется особенностями системообразующих потоков. Учитывая известную взаимообусловленность структуры и динамики при решении данной конкретной задачи, достаточно дополнить выделенные типы ПГЛК необходимыми характеристиками функционирования: сток воды, смык, развитие оврагов, пропускная способность русла и поймы и др.

Основными структурными элементами ПВЗ-массива являются лесные полосы (берегозащитные и водорегулирующие). Система этих лесополос представляет собой как бы каркас, в котором органически увязываются все другие элементы.

Берегозащитная лесополоса располагается на пойме вдоль уреза воды. Ее ширина определяется в зависимости от состояния поймы, режима стока, интенсивности эрозионных процессов в долине, протяженности реки и степени хозяйственного освоения. В нормативных документах [Рекомендации. . ., 1977] определяющим является длина реки. По нашему мнению, целесообразно рассчитать ширину лесонасаждений вдоль русел с учетом всего ПГЛК, а не только длины реки. Тем более нелогично принимать одинаковую ширину лесополос для реки на всем ее протяжении. Тип ПГЛК на том или ином отрезке долины реки определяет оптимальные условия для проведе-

ния ПВЗ-мелиорации. Кроме того, необходимо учитывать, что при со- здании ПЗСКМЗ в долине реки, именно в пределах пойменно-руслово- го парадинамического ряда ПТК, будут располагаться выходы водоотводящих искусственных заложенных лощин. Здесь необходимо создавать илофильтры для очистки и задержания наносов. Они будут образовывать своеобразные конусы выноса и нарушать естественный рельеф поймы. Этот материал в дальнейшем можно использовать для землевания, т. е. покрытия разрушенной почвы слоем плодород- ных отложений — трансплантом.

Необходимо отметить, что при проектировании берегозащитной лесополосы нельзя отказываться от поймы как источника выращивания овощей и пастбища. Можно рекомендовать делать лесополосы, окаймляющие поля и огорода, а не вдоль всего русла.

По мере удаления от русла, в пределах склоново-террасового парадинамического ряда комплексов, устраиваются водорегулирую- щие лесополосы. Они проектируются на надпойменных террасах, склонах коренных берегов. Значение этих лесополос в почвозащитной организации территории очень велико. Они регулируют, смягчают вредные последствия стекающих потоков и ветра. Между тем, если водные потоки всегда двигаются вдоль понижений, то ветер дует со всех сторон, хотя часто выражен поток определенного направления.

Раньше преобладало мнение о необходимости расположения лесополос поперек господствующих ветров (по крайней мере, для районов, где имеет место дефляция). Это привело к тому, что некоторые лесополосы размещались вдоль склона или под углом к линиям стока. Следует иметь в виду, что лесополосы одинаково эффективны против ветров диаметрально противоположных направлений. В то же время установлено, что необходимо очень значительное преобла- дание ветра определенного направления, чтобы отдать предпочтение перпендикулярному ему направлению лесополос [Швебс, 1985].

Надбровочная лесополоса ослабляет силу поверхностного стока с присельевых склонов до размеров, исключающих возможность смыва и размыва нижележащих склонов. Она предотвращает проникновение элементов линейной эрозии со склонов долин на забровоч- ную часть (т. е. на ценные сельскохозяйственные земли), способ- ствует равномерному распределению снежного покрова. Эта полоса всегда является элементом ПЗСКМЗ.

Наиболее полно водорегулирующее и противоэрэзионное влияние лесополос проявляется тогда, когда они расположены перпендику- лярно направлению стока, т. е. примерно вдоль горизонталей. Разме- щение водорегулирующих лесополос должно быть полностью увязано с характером склона (форма, крутизна, длина). Однако склоны долин повышенной крутизны чаще всего бывают расчленены промоинами и ложбинами различных размеров. Из-за сложности рельефа лесо- полосы не всегда удается разместить строго по горизонтали. Следо- вательно, отдельные отрезки лесополосы будут иметь направление вдоль склона. Особенно это характерно для приовражных и приба- лочных полос. В таких случаях рекомендуется устраивать прерыви-

стые валы — канавы с боковыми перемычками поперек лесополос с незначительным выходом их на пашне [Сурмач, 1976а, б].

Учитывая предложения по ландшафтно-контурному земледелию, а также опыт эксплуатации различных водорегулирующих устройств в пределах склонов, нами предлагаются другие их схемы, суть которых в том, что водорегулирующие лесополосы должны являться неотъемлемой частью общего проекта ПЗСКМЗ. Лесные полосы должны совмещаться с другими элементами ПЗСКМЗ (например, из частей вала-ложбины вдоль рубежа I порядка).

Важной стороной правильного размещения водорегулирующих лесополос на склонах является определение оптимальных расстояний между ними и их ширины. Попытки расчета ширины водорегулирующих лесополос и расстояний между ними предпринимались многими исследователями. Предложен ряд формул, выражающих связь между различными параметрами: интенсивностью водоотдачи из снега или слоем стока, впитывающей способностью почвы в лесополосе, длиной и крутизной склона и расчетной шириной лесополосы [Львович, 1952; Арманд, 1961; Сухарев, 1966; и др.]. Расчеты по этим формулам дают разноречивые результаты для одних и тех же условий: ширина лесополос колеблется от 12—15 до 150—200 м. В то же время установлено, что лесополосы принимают концентрированную нагрузку воды не на всем их протяжении, а лишь на определенной части. Таким образом, проблема полностью не решается, если не подходить к ней комплексно, с учетом строения природной системы в целом и в каждой точке территории отдельно. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в расчете на единицу площади узкие полосы (10—15 м) поглощают в 1,5—2 раза больше, чем широкие.

Учитывая все изложенное выше, целесообразно ограничить наибольшую ширину водорегулирующих лесополос до 30 м, обычно же она должна находиться в пределах 12—21 м, а расстояние между ними 200—600 м — в зависимости от уклона и длины склона, типа почв, т. е. от типа долинного ПГЛК. В то же время водорегулирующая лесополоса может прерываться в устьях оврагов и балок. Здесь создаются либо кольматирующие насаждения по всему поперечному профилю балки, либо предусматриваются валы-канавы для перехвата стока. По днищам и конусам выноса балок и оврагов лесополоса может заменяться лугово-кустарниковыми наносоуловителями.

Являясь одним из наиболее эффективных мелиоративных мероприятий, водоохраные зоны, в свою очередь, должны стать неотъемлемой частью общего проекта ПЗСКМЗ, включая преимущественно луго-, лесомелиоративные мероприятия. Особенности ландшафта определяют тот или иной вариант ПЗСКМЗ.

#### 4.3. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Любой участок суши является составной частью иерархической системы водосборов — от микроводосборов потяжин и ложбин до гигантских по площади водосборов больших и великих рек. Созда-

ваемые в пределах водосбора защитные лесные полосы и культуры совместно с естественными лесами составляют систему защитных лесных насаждений. Она служит своеобразным каркасом противоэрозионного комплекса в степной и лесостепной зонах. Основное значение системы защитных лесных насаждений (ЗЛН) — воздействие и управление энерго- и массопереносом на водосборе. Лесные полосы на пути этих потоков способствуют ослаблению их транспортирующей способности, т. е. дают защитный эффект (ветроослабляющий, снегозадерживающий, стокопоглощающий, противоэрозионный и т. д.).

Гидрологическая роль или гидрологическая эффективность лесных насаждений — комплексные понятия и включают в себя несколько составляющих: влияние на снежный покров и его дополнительное накопление, стокорегулирование, дополнительное увлажнение почв и грунта зоны аэрации, пополнение и изменение режима грунтовых вод и их химизма; изменение микроклиматических условий на защищенных лесными полосами полях, режима физического испарения влаги с поверхности почвы и транспирации, в целом экологических условий. Таким образом, для вновь сформированного лесо-аграрного ландшафта с агролесомелиоративными насаждениями характерен специфический гидрологический режим.

Ниже рассмотрены некоторые закономерности и особенности гидрологической роли лесных полос в агроландшафтах черноземного степного Заволжья.

Эта территория имеет полого-волнистый рельеф, склоны изрезаны древними и современными эрозионными образованиями, преобладающий элемент рельефа — длинные, до 800—2500 м, склоны различной крутизны и экспозиции.

Климат континентальный с резкими температурными контрастами, дефицитом осадков и интенсивным испарением. Среднегодовая температура около 4 °С, годовая сумма осадков 320—450 мм, за зиму выпадает 110—130 мм, часты метели, приводящие к перераспределению снежного покрова и к потерям в виде метелевой сублимации. Снеготаяние начинается в III декаде марта и длится 12—17 дней. Весенний поверхностный сток составляет преобладающую часть годового стока. Летом эпизодически выпадают кратковременные интенсивные ливни, формирующие поверхностный сток и оживляющие эрозионные процессы.

Распаханность района высокая — 70—80 %, естественная разнотравно-ковыльно-типчаковая степь сохранилась лишь по крутым склонам лощинно-суходольной сети. Лесистость низкая — 3,3 %. Леса встречаются в основном по поймам рек и на землях суходольного гидрографического фонда (байрачные). Преобладающие породы — дуб, береза, осина, тополь, сосна и др.

Почвообразующие породы представлены четвертичными сыртовыми красно- и желто-бурыми глинами и суглинками. Почвы — обычные и южные черноземы разной степени смытости. Процессы водной эрозии широко развиты. Среднегодовой смыг почвы за период сельскохозяйственного освоения (200—220 лет) составил

2,2—2,6 м<sup>3</sup>/га [Сурмач, 1976а, б]. Лесные полосы стали создаваться с конца XIX в., но наибольшее распространение получили с 1948—1950 гг.

Исследования проводились в полезащитно-водорегулирующих полосах продуваемой, ажурной и плотной конструкции, состоящих из дуба, ясения и других древесных пород. При этом на комбинированных лесных и полевых стоковых площадках использовался метод водного баланса, репрезентативные и опытные водосборы исследовались по специальных программам и методикам [Панов, 1975].

Многолетние снегомерные съемки проводились в четырех типах ландшафтов: приводораздельном полевом (без лесных полос), лесомелиорированном (лесоаграрном) с размещением лесных полос через 500 и 250 м и в водораздельном массивном лесу (водораздельные 640-метровой ширины лесные полосы, созданные в конце XIX—в начале XX в. известным русским лесоводом Н. К. Генко). Результаты работ свидетельствуют о высоком снегораспределяющем и снегонакопительном влиянии леса и систем лесных полос в степи.

Так, в среднем за последние 15 лет (табл. 4.1) на открытом (безлесном) водораздельном агроландшафте к концу зимы накапливался снежный покров высотой 26 см, плотностью 0,30 г/см<sup>3</sup> и влагозапасом 78 мм. В лесоаграрном ландшафте с системами лесных полос через 500 м за зиму устанавливался более высокий снежный покров (38 см) с влагозапасом 112 мм, или на 34 мм больше, чем на открытом полевом. Лесоаграрный ландшафт с частой системой лесных полос (через 250 м) обладает более высоким снегозадерживающим эффектом, чем расположенные через 500 м лесополосы: средневзвешенная высота снега 42 см, влагозапас 122 мм, или на 44 мм больше, чем в безлесном полевом. В лесном водораздельном массиве, где нет метелевого переноса, снега накапливается за зиму 140 мм, или на 62 мм больше, чем в открытом поле.

Таким образом, в среднем за 15 лет потери снега с открытого поля за счет метелевого переноса и сублимации составили 62 мм. Система защитных лесных полос способствовала сохранению на защищаемых полях 34—44 мм осадков, или дополнительно к запасам открытого поля 55—71 %.

Снежный покров в системе лесных полос распределяется неравномерно. Так, по наблюдениям в 1981—1985 гг. в зоне эффективного влияния лесной полосы с подветренной опушкой (I зона) снег имел мощность 60—61 см, влагозапасы составили 180—183 мм, во II зоне (средняя часть межполосного поля) — 34—37 см, 102—111 мм

Таблица 4.1

Характеристика снежного покрова в открытых и лесомелиоративных ландшафтах за период 1970—1984 гг.

Ландшафт	Высота, см	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Влагозапас, мм
Открытый полевой (безлесный)	26	0,30	78
Лесоаграрный с лесными полосами			
через 500 м	38	0,29	112
через 250 м	42	0,29	122
Лес массивный, водораздельный	61	0,23	140

и в III зоне (вблизи наветренной опушки) — 48—49 см, 144—147 мм. Таким образом, при впитывании талых вод вблизи лесных полос и под ними совместно с поступлением поверхностного стока здесь наблюдаются периодическое сквозное промачивание зоны аэрации, значительное увлажнение почвогрунта, пополнение и подъем грунтовых вод.

При создании на склоновых полях систем ЗЛН и прежде всего полезащитных и водорегулирующих лесных полос ажурной и продуваемой конструкций снегораспределение на защищаемых полях значительно улучшается, становится более равномерным (средняя за 1976—1979 гг. высота снежного покрова, см):

Удаление от лесной полосы, м	125	100	75	50	25
Конструкция продуваемая	35	45	54	81	98
плотная	39	39	35	56	111

Однако под продуваемыми и сильно продуваемыми полосами снега накапливается мало и здесь формируется непромывной тип водного режима.

При значительном водопотреблении древесных пород (500—700 мм в возрасте 30—50 лет) под лесной полосой создается почти ежегодный дефицит влаги и при глубоком начальном залегании грунтовых вод (8—10 м и глубже, т. е. вне ризосфера растений) и засоленности грунтов зоны аэрации устойчивость насаждений уменьшается, что со временем приводит к постепенному распаду насаждений, а в конечном счете — к дестабилизации и разрушению лесоаграрного ландшафта. Поэтому необходимо существенное улучшение влагообеспеченности ажурно-продуваемых лесных полос наряду с применяемыми уходами за почвой и увеличением площадей деревьев, т. е. с обычными мерами накопления и сбережения влаги.

Приведенные количественные характеристики показывают, что системы лесных полос в условиях степной зоны Северного Поволжья дополнительно накапливают снег на защищаемой ими территории порядка 40—60 мм, или 400—600 м<sup>3</sup>/га, что равноценно одному-двум вегетационным поливам на орошаемых землях. Отсюда видна большая снегосберегающая роль систем лесных полос, способствующая существенному улучшению приходной части водного баланса защищаемой территории.

Весенне снеготаяние и формирующийся в результате этого водный баланс во многом определяют гидрологический режим территории, уровень почвенных и грунтовых вод.

Результаты 5-летних (1981—1985) наблюдений за балансом поверхностных вод в весенний период на экспериментальных водо-сборах с разными ландшафтами в обобщенном виде приведены в табл. 4.2. Так, склоновое пастбище южной экспозиции (ветроударный склон) имеет наименее благоприятный баланс весенних поверхностных вод. Здесь накапливается 107 мм влаги в снеге, теряется в виде поверхностного стока 57 мм (коэффициент стока 0,53); впиталось в почву 46 мм, с учетом испарения коэффициент освоения осадков составляет около 0,43. Смыт почвы в этом ландшафте

Таблица 4.2

Баланс весенних поверхностных вод в разных ландшафтах за 1981—1985 гг.

Вид ландшафта	Сумма влагозапасов в снеге и осадков периода снеготаяния, мм	Поверхностный сток, мм	Коэффициент стока	Испарение за период снеготаяния, мм	Фильтрация в почву, мм	Смыг почвы, м <sup>3</sup> /га
Склоновое перевыпасаемое пастбище (водосбор «Пастбище»)	107	57	0,53	4	46	0,06
Открытые поля с зябью (водосбор «Полевой»)	138	15	0,11	6	117	0,32
Лесоаграрный с системой лесных полос	170	9	0,05	8	153	0,06
Приводораздельный массивный лес (водосбор «Массивный лес»)	170	0	0	8	162	0

небольшой — 0,06 м<sup>3</sup>/га — вследствие плотного сложения верхнего слоя почвы и формирования травянистой растительности.

Открытые (безлесные) поля восточной (В) экспозиции, занятые в течение 5 лет зябью глубиной 22—24 см, имели более рациональный баланс весенних поверхностных вод: снегонакопление 138 мм (более высокое за счет метелевого переноса). Поверхностный сток с зяби составил 15 мм (коэффициент стока 0,11), т. е. зяблевая вспашка за 5-летие уменьшила в сравнении с пастбищем сток на 35—42 мм и на каждый 1 см глубины вспашки приходится 1,5—1,8 мм поглощаемой влаги. Водопоглощение равно 117 мм, или на 71 мм больше водопоглощения на пастбище, коэффициент освоения осадков — 0,34. Смыг почвы оказался значительно больше, чем на пастбище, — 0,32 м<sup>3</sup>/га, несмотря на меньший сток. Это связано с разрыхленным состоянием почвы и ее подверженностью смыгу.

Лесоаграрный ландшафт, представленный комплексным экспериментальным водосбором «Питомник», имеет на приводораздельных пахотных землях систему полезащитно-водорегулирующих лесных полос через 200 м, усиленных вдоль нижней по склону опушки валами. На полях пашется глубокая (27—30 см) зябь поперек склона, присетевые земли и суходольная гидрографическая сеть занята балочными естественными лесами и лесными культурами. Водосбор имеет современный противоэрозионный комплекс. В среднем за 5 лет основные элементы баланса весенних поверхностных вод следующие: влагозапас 170 мм, или на 32 мм больше, чем на открытых полях той же экспозиции, и на 63 мм больше, чем на ветроударном пастбище южной экспозиции; поверхностный сток зарегулирован в большей степени, чем на необлесенной зяби, и составил 9 мм (коэффициент стока 0,05) и при испарении за период снеготаяния 8 мм водопоглощение равно 153 мм (коэффициент освоения осадков 0,90), смыг почвы был незначительный и имел локальный характер.

Таблица 4.3

Влажность почв под прибалочной лесной полосой из березы в конце августа 1982 г., %

Глубина почвенного горизонта, см	Межложбинный водо-раздел	Дно ложбины	Глубина почвенного горизонта, см	Межложбинный водо-раздел	Дно ложбины	Глубина почвенного горизонта, см	Межложбинный водо-раздел	Дно ложбины
10	10,1	17,6	40	12,3	16,0	100	8,8	13,2
20	11,7	17,6	50	10,4	15,2	125	9,6	12,6
30	11,4	16,8	75	10,2	13,0	150	8,9	13,4

Лесной массив, представленный хвойными и лиственными культурами (возраст 40—50 лет) и естественными насаждениями, накапливает влагозапас 170 мм (без учета опушечных сугробов), поверхностный сток отсутствует и вся талая вода, за исключением испарившейся, впитывается (коэффициент освоения осадков 0,95). Смыг почвы отсутствует.

Различные конструктивные особенности лесных полос, их расположение на элементах рельефа, возраст и состав насаждений и многие другие факторы определяют большие различия в их водном режиме — степени увлажнения почв и промачивания всей зоны аэрации, динамике грунтовых вод. При частой повторяемости в степной зоне засушливых лет недостаток влаги приводит к ослаблению устойчивости, физиологическим нарушениям, а последующие засухи — и к гибели насаждений. Поэтому одной из важнейших задач защитного лесоразведения, наряду с высоким защитно-мелиоративным воздействием, является создание условий для обеспечения хорошего увлажнения самих лесных полос, что определяет их устойчивость и долговечность, а следовательно, и стабильность всего лесоаграрного ландшафта.

При недостаточном поступлении влаги в полосу весной к концу засушливого вегетационного периода она полностью расходует доступную влагу, испытывает физиологическое иссушение, сбрасывает листву, а береза засыхает. Такое наблюдалось в засушливом 1982 г. в лесной полосе, состоящей из березы в возрасте 18 лет. Как видно из табл. 4.3, там, где лесная полоса имела ограниченные с весны влагозапасы (межложбинное возвышение, водораздел), доступная (продуктивная) влага, была исчерпана, береза сбросила листья, а в 1983 г. засохла. По ложбинным понижениям в верхнем 100-сантиметровом слое влажность почвы была выше влажности завядания, береза перенесла засуху и в последующие годы продолжала расти.

Аналогичная обстановка сложилась в этот год и в других лесных полосах, особенно продуваемой и ажурной конструкций, на ровных участках при отсутствии поступления поверхностного стока с вышележащего по склону поля. В качестве примера в табл. 4.4 показана влажность почв в середине августа засушливого 1982 г. в водорегулирующей лесной полосе № 5 посадки 1950 г. смешанного состава с преобладанием березы, ясения, клена остролистного, дуба, обвало-

Таблица 4.4

Влажность почвы в лесных полосах с гидротехническим усилением в конце вегетационного периода 1982 г., %

Глубина почвенного горизонта, см	Полоса № 5	Полоса № 51
10	23,3/17,1	17,1/13,0
20	23,5/18,4	16,7/15,3
30	23,1/19,4	15,8/14,4
40	22,4/16,8	17,3/13,5
50	22,3/17,1	16,7/12,4
75	20,8/16,9	15,6/11,7
100	17,0/15,5	15,4/11,2
125	18,0/15,5	14,3/11,1
150	19,1/16,2	15,0/12,0

Примечание. В числителе — доля участка, усиленного валом; в знаменателе — доля участка без усиления.

Таблица 4.5

Расход влаги сельхозкультурой и лесными полосами за вегетационный период 1980 г., мм

Растение	Слой почвы, см		
	0—50	0—100	0—150
<i>Открытое поле (без лесных полос)</i>			
Пшеница озимая	160	183	176
яровая	207	232	272
Кукуруза	172	223	245
<i>Лесные полосы</i>			
Дуб (№ 3)	233	267	296
Ясень, клен (3-рядная, № 31)	194	237	292
Лиственица, ясень, клен (№ 32)	185	228	285
<i>Межполосное поле шириной 250 м</i>			
Пшеница озимая	171	218	228
яровая	164	237	248
Кукуруза	202	247	250

ванной вдоль нижней опушки, и на контрольном необвалованном участке. Определена также влажность в лесной полосе № 51 посадки 1966—1969 гг. из березы на участке с гидротехническим усилением (канава) и без усиления. Из табл. 4.4 следует, что участки лесных полос, расположенные поперек склона и усиленные гидротехническими устройствами (валами, прерывистыми канавами), поглощают значительно больше талых поверхностных вод, поступающих с вышележащих по склону полей, чем участки без гидроусиления. Эта дополнительная влага создает нормальный рост и развитие древесных пород полосы даже в условиях часто повторяющихся остро-засушливых вегетационных периодов. В слое 0—100 см влажность почв была на 3,7—4,1 %, а в слое 0—150 см — на 3,5—3,7 % выше, чем в полосах без гидроусиления. Летом 1983 г. березы на участке без гидроусиления в лесной полосе № 51 на 50—60 % засохли. Особенности полевого расхода влаги различными сельхозкультурами на открытом и облесенном поле, а также лесными полосами за вегетационный период 1980 г. показаны в табл. 4.5.

Древесные породы в лесных полосах расходуют из почвенных слоев значительно больше влаги, чем сельхозкультуры, а следовательно, и труднее переносят засухи. Так, по исследованиям И. С. Нигматуллина, проведенным в 1981—1984 гг., в среднем за 4 года древесные породы лесных полос № 3, 31 и 32 на Поволжской АГЛОС из слоя 0—400 см расходовали за вегетационный период (май—сентябрь) от 422 мм (№ 31, где грунтовые воды находятся на большой глубине — более 10 м, т. е. ниже ризосфера) до 558—578 мм (№ 3, где грунтовые воды залегают на глубине 3,5—4,5 мм и через капиллярную кайму подпитывают корни деревьев).

Таким образом, системы защитных лесных полос существенно влияют на влажность почв и увлажнение всей зоны аэрации.

Дополнительно накопленная влага используется растительными сообществами на формирование большей биомассы. Однако не вся впитавшаяся вода идет на увлажнение почвы, транспирацию и физическое испарение. Часть гравитационной влаги просачивается за пределы ризосфера растений и достигает грунтовых вод. В результате этого имеет место подъем уровня грунтовых вод, изменение их динамики и химизма. Но происходит это только в случае значительного поступления влаги.

Водопоглощение в лесных полосах определяется многими условиями и факторами — размещением, конструкцией, шириной, возрастом и породным составом полосы, запасом воды в снеге, слоем стока и особенностями его поступления в полосу, скоростью впитывания и др. На все факторы водопоглощения можно активно, целенаправленно воздействовать в целях повышения их эффективности. Сочетание лесной полосы с простейшими гидротехническими устройствами дает биоинженерную систему. В качестве усиливающих водопоглощение устройств целесообразно использовать валы с перемычками, прерывистые канавы, шурфы, щели-дрены и др. Сочетание полезащитных, водорегулирующих и приовражно-прибалочных полос с простейшими гидротехническими устройствами в 60—80-е гг. было предложено и экспериментально изучено методом стоковых площадок опытной сети ВНИАЛМИ.

Полученные многолетние экспериментальные данные показали высокую эффективность таких биоинженерных систем. В Среднем Поволжье в зависимости от степени усиления, слоя, длины линии стока и других условий дополнительно поглощается почвой 170—400 мм (а в отдельные многоводные годы — до 780—900 мм), что в несколько раз больше, чем в полосах без усиления и на полях. Такое большое впитывание под полосами и в зонах прилегающих снежных шлейфов на полях создает нехарактерный для открытых полей (агроландшафтов) частично промывной тип водного режима, что способствует трансформации режима зоны аэрации и верхнего горизонта грунтовых вод.

Системы защитных лесных полос существенно видоизменяют элементы баланса поверхностных вод, а из-за неравномерности поступления и впитывания на отдельных участках защищаемой территории наблюдаются локальное сквозное промачивание всей толщи зоны аэрации, сезонное изменение режима грунтовых вод верхнего горизонта.

Изучение грунтовых вод начато в 1963—1968 гг., когда основным насаждениям исполнилось 13—18 лет. Поэтому первоначальный уровень залегания грунтовых вод можно определить лишь ориентировочно, исходя из особенностей его залегания на аналогичных по геологическим и геоморфологическим условиям близлежащих безлесных сырььевых водоразделах и склонах и по положению грунтовых вод в центрах межполосных полей.

Для режима верхнего горизонта грунтовых вод исследуемых территорий характерны некоторые сезонные и многолетние особенности. В зависимости от снежности зимы в марте — июне наблюда-

ется их резкий подъем, а затем постепенное понижение до минимума зимой. Такие процессы наиболее выражены в верхних горизонтах.

Подъем грунтовых вод наибольший под полосами и в зонах полевых снежных шлейфов и значительно меньший под центрами межполосных полей. Так, по I облесенному севообороту грунтовые воды поднялись за 22 года от 0,16 до 3,75 м, по II севообороту за 18 лет — от 0,18 до 8,85 м. Более высокий подъем грунтовых вод в лесоаграрном ландшафте связан с особенностями водопоглощения под лесными полосами и их размещением: большинство полос расположено поперек склона и являются водорегулирующими. Они усилены валами вдоль нижних по склону опушек, в результате чего водопоглощение здесь весной в 1,5—2,5 раза больше, чем в полосах без усиления. Среднегодовой подъем уровня по I севообороту составил 0,008—0,187 м, по II — 0,010—0,520 м.

На лесомелиорированных территориях снижается дефицит влаги в засушливые годы не только за счет ежегодного дополнительного накопления снега, но прежде всего за счет привлечения в формирование урожая аккумулированной за прошлые годы влаги через подпитку корней капиллярной каймой над близкозалегающими грунтовыми водами. Это создает благоприятные предпосылки стабилизации высокой фитопродуктивности лесомелиорированных полей в условиях засух.

Таким образом, система узких полезащитно-водорегулирующих лесных полос на склонах создает новый тип антропогенного ландшафта — лесоаграрный — со свойственными для него новыми чертами гидрологического режима: увеличиваются приходные статьи водного баланса, интенсифицируется в целом водообмен в ризосферной зоне с привлечением почвенных вод зоны аэрации и близкозалегающих грунтовых вод. Общий дополнительный резерв влаги лесоаграрного ландшафта — 70—80 мм, что делает его устойчивым в отношении фитопродуктивности в засушливые годы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современного состояния исследований по проблемам гидрологической роли лесных геосистем, проведенный в монографии, приводит к противоречивым выводам. С одной стороны, к настоящему времени накоплен большой фактический материал, отражающий основные закономерности гидрологических процессов в различных типах леса или в различных по лесистости речных бассейнах. Длительность временных рядов данных наблюдений достаточно велика для статистически достоверных выводов. В отдельных случаях специальные исследования сопровождаются детальным описанием самих объектов — геосистем, что позволяет определить весь набор влияющих географических и других факторов. С другой стороны, методы лесогидрологических исследований, выбор и описание объектов не унифицированы. Все это существенно затрудняет сравнение полученных разными авторами результатов. Не упорядочена пространственная иерархия анализируемых природных образований и явлений: изучение гидрологических процессов ведется и на уровне биогеоценоза (см. разд. 2.1, 2.7, 3.2, 3.3), и на уровне речного бассейна (см. разд. 1.3, 1.6, 2.6), и на уровне зон и подзон (см. разд. 1.4, 2.2, 2.3, 3.4). В итоге выводы авторов в определенной степени противоречивы. Единственный способ обобщить полученные результаты — рассматривать процессы с позиций ландшафтно-гидрологического подхода, т. е. сопоставляя гидрологические процессы с типом и пространственным уровнем анализируемой геосистемы.

Экспериментальные лесогидрологические исследования, по своей сути, уникальные, дорогостоящие и трудоемкие. Поэтому на первых стадиях организации таких работ важно четко поставить задачу и определить наиболее эффективный путь ее решения. Часто наблюдения за элементами водного баланса носят отвлеченный характер и только на стадии анализа полученных данных вырабатываются цель и позиция автора к проведенным исследованиям. Но низкая точность полученных данных, отсутствие полного описания влияющих факторов и пространственной привязки объектов не позволяют достигнуть достоверных результатов. В этом плане интересны ландшафтно-гидрологические проработки, выполненные в разд. 1.2 и 4.2. Отсутствие необходимой информации заставляет авторов при создании моделей гидрологических процессов прибегать к грубым допущениям. Например, в условиях достаточного и избыточного

увлажнения отождествлять суммарное испарение с лесом с испаряемостью (кстати, весьма распространенная ошибка ряда исследователей). В то же время моделирование — это лучший итог лесогидрологических разработок, основа системы управления гидрологическими процессами. Создание физически обоснованной модели позволяет по-новому подойти к взаимосвязи отдельных звеньев в рамках всей проблемы в целом, увязать гидрологические свойства леса в единую систему.

Известно, что уровень развития научного направления можно определить по степени разработанности терминологического аппарата. В монографии авторы достаточно однозначно трактуют водорегулирующую, водоохранную, почвозащитную функции лесов. В то же время с позиции ландшафтно-гидрологического подхода целесообразно расширить представление о гидрологической роли лесных геосистем. В понятие этого термина целесообразно включать и описание системной роли анализируемого природного объекта в функционировании геосистемы более высокого пространственного уровня. Действительно, роль биогеоценоза на водоразделе, склоне или в долине реки в формировании стока с бассейна будет различна. В свою очередь, лесной массив в малом речном бассейне в зависимости от условий увлажненности будет иметь неодинаковое воздействие на сток средней реки.

При исследовании отдельных звеньев гидрологического цикла в лесных геосистемах широко используется метод водного баланса с инструментальным либо расчетным определением основных элементов — атмосферных осадков, стока, испарения. И если осадки и сток измеряются достаточно точно, то оценка суммарного испарения остается весьма не корректной. Отсутствует методика измерения важнейшей составляющей этого звена водообмена — транспирации лесной растительности. Метод быстрого взвешивания, предложенный Л. А. Ивановым, единственно возможный для применения в естественных условиях, вызывает большие нарекания из-за большой трудоемкости и отсутствия уверенности у многих исследователей в его достоверности. Лизиметрические определения транспирации также не дают достоверных результатов из-за нарушения естественного хода процессов. В итоге этот узловый элемент водного баланса леса по-прежнему слабо изучен, что приводит и к различным оценкам гидрологической роли леса.

Одним из приемов определения гидрологической роли леса был и остается метод сравнения осадков, испарения и стока с бассейнов разной залесенности или лесных и безлесных геосистем. Различия между водобалансовыми величинами для этих объектов, как показали исследования, крайне незначительны и соразмерны или даже меньше ошибки измерений. Для объективного решения задачи необходимо провести статистический анализ достоверности полученных соотношений либо найти их физическое обоснование. К неверным выводам приводят и методические ошибки при оценке стока с малых бассейнов, где из-за неглубокого эрозионного вреза русло водотока дренирует лишь часть подземной составляющей стока, которая на

лесных водосборах значительно больше, чем на малооблесенных или безлесных. В результате измеренный сток с первых бассейнов часто ниже, чем в последних. Отсутствие же надежных данных об испарении с лесных массивов не позволяет решить задачу методом водного баланса. Следует учитывать и справедливое замечание В. В. Рахманова (см. разд. 4.1) о наличии глубинной фильтрации в артезианские воды, которая в лесных массивах может быть большой интенсивности. Такой процесс относительно питания глубоких горизонтов можно рассматривать как одну из особенностей гидрологической роли леса.

В ряде случаев за гидрологическую роль леса могут ошибочно приниматься его индикативные свойства. Этот момент наглядно иллюстрируется исследованиями в Западной Сибири (см. разд. 2.5). В речных бассейнах лесоболотной зоны равнины формирование основных объемов речного стока осуществляется в узкой дренированной полосе вдоль русел водотоков. К ним же приурочены и суходольные сосновые, кедровые и другие типы леса. В итоге при разработке статистических зависимостей авторы выделяют лесистость как основной фактор стокообразования, хотя в этом случае лесные геосистемы только индицируют условия дренирования.

Как и во многих работах, в данной на большом числе примеров доказываются важнейшие функции леса — фактора внутригодового перераспределения стока. Он снижает максимальные модули паводков и половодий, увеличивает межень. В среднемноголетнем разрезе годовой сток с лесных водосборов в лесной зоне на различных территориях, как правило, выше, чем с малозалесенными. В горных лесах однозначного вывода об этом соотношении не получено. В лесостепной зоне, для которой характерно островное распределение малых лесных массивов, разница между стоком в лесу и в поле может иметь отрицательный знак из-за большого расхода влаги на суммарное испарение с лесных геосистем под влиянием адвекции.

Важным аспектом воздействия лесной растительности на водообмен является пространственное перераспределение стокообразования в пределах бассейнов разной пространственной размерности. Общеизвестна роль леса на водоразделах и в долинах водосборов, но не определена роль типологической структуры массива, хотя каждый тип леса имеет свои специфические особенности формирования воднобалансовых элементов. Познание всей совокупности воздействия пространственной природной структуры речного водосбора на процессы — это очень важный элемент управления формированием водных ресурсов, что нашло свое подтверждение в разд. 1.5.

Многочисленные экспериментальные исследования, выполненные в различных регионах (северо-запад ЕТС, Приморье, Карпаты и др.), показывают, что наиболее значительные изменения гидрологическая роль леса претерпевает в результате проведения хозяйственных мероприятий (вырубки и восстановление лесов, лесная мелиорация, создание водоохраных полос). Но в различных географических условиях эти изменения имеют свой специфический характер. Большую роль играет техническая сторона лесохозяйственных меро-

приятий. Так, рубки ухода способствуют усилению водорегулирующей роли леса, а сплошные, концентрированные, особенно в горных районах, — существенному ее снижению.

Как и все природные системы, лесные обладают способностью к саморазвитию и восстановлению. Каждому этапу их функционирования свойствен свой тип взаимодействия леса и вод. Особенно контрастно проявляются эти свойства в стадии восстановления лесной растительности после хозяйственных мероприятий, прежде всего после рубок. В ряде разделов монографии показаны различные формы последовательного переформирования гидрологического режима после лесоведения в зависимости от вида проведенного мероприятия. В одних случаях возврат к естественному режиму может происходить быстро, например при выборочной рубке и сохранении подроста. В других этот процесс длится десятки лет, особенно в горных лесах с высоким атмосферным увлажнением. Поэтому в каждом конкретном случае ведение лесного хозяйства должно иметь четко выраженную региональную специфику.

Не менее важным является и создание водоохранных, водорегулирующих и противоэрозионных лесных полос. В качестве яркого примера комплексного планирования полос можно привести ландшафтно-гидрологический анализ, проведенный Г. И. Швебсом (см. разд. 4.2), или решение систем эмпирических уравнений (см. разд. 1.5). При этом следует отметить, что воздействие лесных насаждений на условия окружающей их территории носит комплексный характер и отражается не только на гидрометеорологическом режиме, но и на развитии почвенного покрова. Одновременно создаются благоприятные местообитания для биологической компоненты биогеоценоза. Поэтому при формировании этих насаждений необходимо исходить из комплексного, ландшафтного подхода.

Подводя итоги проделанного в монографии анализа, следует еще раз отметить высокую актуальность лесогидрологических проблем. Природа придала лесным геосистемам важнейшие экологические, гидрологические, ландшафтообразующие и многие другие функции. Познание этих свойств — современное требование не только науки, но и прежде всего практики. Однако процесс познания очень трудоемок, а вследствие этого и исследования остаются эпизодическими, охватывающими только некоторые регионы страны (прежде всего европейскую часть), причем экспериментально-техническая база работ требует приведения ее в соответствие с поставленными задачами. Дальнейшее развитие необходимо и для теоретических и методических вопросов лесной гидрологии, прежде всего по унификации научных концепций специалистов различных ведомств и служб. Надеемся, что предложенная вниманию читателей монография внесла определенный вклад в решение некоторых насущных лесогидрологических проблем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г. А. Расчеты паводочного стока рек СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1955. — 198 с.
- Альбова А. М., Маркус Я. А. Крупномасштабные ландшафтные исследования территорий стационаров (на примере Истринского опорного пункта ВНИИЛМ) // Научно-техническая революция и методы географического анализа. — М.: Изд-во МГУ, 1977. — С. 5—14.
- Андреянов В. Г., Воскресенский К. П., Глущенко И. Я., Панова Н. Ф. Исследование повторяемости и продолжительности периодов различной водности на реках СССР // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1965. — Вып. 127. — С. 227—275.
- Аникеева В. А., Чертовской В. Г. Об осадках как экологическом факторе в северотаежных черничниках // Экология таежных лесов. — Архангельск, 1978. — С. 43—54.
- Аникеева В. А., Елизаров Ф. П., Кубрак Н. И. Аккумуляция снега в предтундровых и северотаежных ельниках // Вопросы предтундрового лесоводства европейской части СССР. — Архангельск, 1983. — С. 51—61.
- Антипов А. Н., Антилова Н. Д. Оценка транспирационного расхода растительными сообществами горно-таежных геосистем // География и природ. ресурсы. — 1980. — № 4. — С. 115—124.
- Антипов А. Н., Корытный Л. М. Географические аспекты гидрологических исследований. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. — 175 с.
- Антипов А. Н., Черкашин А. К. Системный анализ влияния леса на сток с использованием материалов лесоустройства // Гидрологические исследования ландшафтов. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. — С. 102—114.
- Арманд Д. Л. Физико-географические основы проектирования сети полезащитных лесных полос. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 367 с.
- Бабкин В. И. Исследование внутригодовой зарегулированности стока рек Белорусской ССР и Верхнего Поднепровья // Сборник работ по гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат. — 1970. — № 9. — С. 59—95.
- Бабкин В. И., Гусев О. А., Румянцев В. А. Моделирование характеристик стока и водосборов рек бассейна Дона с применением факторного анализа // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1972. — Вып. 200. — С. 3—25.
- Богомолов Г. В., Альтшуль А. Х., Успенко В. С. и др. Искусственное восполнение запасов подземных вод. — М.: Наука, 1978. — 172 с.
- Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим / Под ред. Иванова К. Е., Новикова С. М. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 446 с.
- Бочевер Ф. М., Ковалева И. А. Эксплуатационный режим подземных вод в Московском артезианском бассейне // Проблемы гидрогеологии и инженерной геологии. — Минск, 1978. — С. 119—129.
- Бочков А. П. Влияние леса и агролесомелиоративных мероприятий на водность рек лесостепной зоны европейской части СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1954. — 136 с.
- Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. — Л.: Гидрометеоиздат, 1948. — 136 с.
- Будыко М. И. Климат и жизнь. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 470 с.
- Будыко М. И. Термический режим динозавров // Журн. общ. биологии. — 1978. — № 2. — С. 179—188.

- Будыко С. Х.** О влиянии леса на водный режим рек // Научные работы ин-та леса АН БССР. — 1956. — Вып. 7. — С. 80—95.
- Виноградов Б. В.** Раствительные индикаторы и их использование при изучении природных ресурсов. — М.: Высш. шк., 1964. — 328 с.
- Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза.** — Л.: Гидрометеоиздат, 1967. — 200 с.
- Водогрецкий В. Е.** Влияние агролесомелиораций на годовой сток. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 184 с.
- Водогрецкий В. Е.** Эмпирико-математическая модель учета преобразования годового стока под влиянием агротехнических мероприятий и леса // Проблемы рационального использования и охраны малых рек. — Красноярск, 1982. — С. 39—52.
- Водогрецкий В. Е., Зайцева Э. А.** Результаты дополнительных исследований о влиянии леса на максимальные расходы воды весеннего половодья // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1978. — Вып. 255. — С. 122—134.
- Водогрецкий В. Е., Зайцева Э. А.** Влияние леса на слой весеннего половодья // Там же. — 1984. — Вып. 291. — С. 27—35.
- Воейков А. И.** Климаты земного шара, в особенности России // Избр. соч. — М.; Л., 1948. — Т. 1. — С. 163—728.
- Волков В. И.** Изменение гидроклиматического режима в дубняках Южного Приморья под влиянием изреживания // Материалы научной конференции по изучению лесов Сибири и Дальнего Востока. — Красноярск, 1965. — С. 124—128.
- Волков В. Н.** Влияние прореживания на режим влажности почвы в дубовых древостоях Южного Приморья // Биогеоценотические исследования в лесах Приморья. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1968. — С. 53—79.
- Волков В. Н. И.** Принципы и методы картометрии. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — 327 с.
- Волобуев В. Р.** Соотношение между режимом влажности почв и климатом приземного слоя воздуха // Почвоведение. — 1983. — № 3. — С. 51—62.
- Волокитина А. В.** Особенности распределения дождевых осадков под пологом хвойного леса // Лесоведение. — 1979. — № 2. — С. 40—48.
- Воронков Н. А.** Влагооборот и влагообеспеченность сосновых насаждений. — М.: Лесн. пром-сть, 1973. — 184 с.
- Воронков Н. А.** Элементы водного баланса леса в зависимости от почвенно-грунтовых условий и породного состава насаждений // Вопр. географии. — 1976. — Сб. 102. — С. 122—134.
- Воронков Н. А., Павлушкин Л. Т.** Изучение испаряемости в лесных фитоценозах с помощью микропарипелей // Лесоведение. — 1973. — № 2. — С. 77—85.
- Высоцкий Г. Н.** О гидрологическом и метеорологическом влиянии лесов. — 2-е изд. — М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. — 112 с.
- Галенко Э. П.** Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойного леса Европейского Севера. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1983. — 128 с.
- Галущенко Н. Г.** Водный баланс рек бассейна Днестра // Тр. ин-та / Укр. н.-и. гидрометеорол. ин-т. — 1977. — С. 126—139.
- Гарцман И. Н.** Проблемы географической зональности и дискретности гидрометеорологических полей в горных условиях муссонного климата // Тр. ин-та / Дальневост. н.-и. гидрометеорол. ин-т. — 1971. — Вып. 35. — С. 3—30.
- Гарцман И. Н.** Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Вод. ресурсы. — 1973. — № 3. — С. 110—124.
- Гарцман И. Н., Горчаков А. М., Иванов Г. И.** О поверхностном стоке дождевых вод на генетически разнородных почвах Приморья // Особенности почвообразования в зоне бурых лесных почв. — Владивосток, 1967. — С. 125—126.
- Гарцман И. Н., Лыло В. М., Черненко В. Г.** Паводочный сток рек Приморья // Тр. ин-та / Дальневост. н.-и. гидрометеорол. ин-т. — 1971. — Вып. 34. — 364 с.
- Гелета И. Ф., Ильина С. П., Никитин С. П.** Составление и анализ карт влияния природных условий на распределение растительности (на примере Прииртышья) // Карты полей плотности в географических исследованиях. — Иркутск, 1978. — С. 55—64.
- Герасимов И. П.** Структурные черты рельефа земной поверхности на территории СССР и их происхождение. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 100 с.
- Глушков В. Г.** Вопросы теории и методы гидрологических исследований: Географо-гидрологический метод. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 416 с.

- Гопченко Е. Д. Обоснование параметров редукционной формулы для расчета максимального стока рек // Вод. ресурсы. — 1976. — № 4. — С. 34—40.
- Городецкая М. Е., Мещеряков Ю. А. О закономерностях морфоструктурного плана Западно-Сибирской равнины // Структурно-геоморфологические исследования в Сибири. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1970. — Вып. 1. — С. 25—31.
- Горчаковский П. Л. Водоохранное и почвозащитное значение высокогорных лесов Урала // Лесн. хоз-во. — 1952. — № 4. — С. 18—21.
- Горшенин Н. М. Влияние сплошных рубок на режим стока в горных условиях Карпат // Вестн. с.-х. науки. — 1959. — № 11. — С. 90—97.
- Данилик В. Н. Влияние техники и технологии лесозаготовок на водоохранно-защитную роль леса // Лесн. хоз-во. — 1979. — № 1. — С. 24—26.
- Денисов А. К. Водорегулирующая роль леса в районах карста Марийской АССР // Всесоюзное совещание по водоохранно-защитной роли горных лесов. — Красноярск, 1975. — Ч. 1. — С. 37—39.
- Доклады иностранных ученых на Международном симпозиуме по влиянию леса на внешнюю среду. — М.: ФАО — Гослесхоз СССР, 1970. — 250 с.
- Дробиков А. А. Изменение физико-химических свойств воды под влиянием рубок // Лесоведение. — 1973. — № 3. — С. 3—9.
- Дроздов О. А. К вопросу об изменении осадков в связи с системой полезащитных мероприятий в степных и лесостепных районах европейской территории СССР // Вопросы гидрометеорологической эффективности полезащитного лесоразведения. — Л.: Гидрометеоиздат, 1950. — С. 30—37.
- Дубах А. Д. Лес как гидрологический фактор. — М.: Гослесбумиздат, 1951. — 160 с.
- Дубов А. С., Быкова Н. С., Марунич С. В. Турублентность в растительном покрове. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 183 с.
- Дьяков В. Н. Влияние состава насаждений на водный режим горных почв Карпат // Лесоведение. — 1976. — № 1. — С. 11—17.
- Епихов Г. П. Системное моделирование процессов водообмена в диалоговом режиме // Вод. ресурсы. — 1985. — № 5. — С. 11—25.
- Ершова Л. М. Изменение водного режима рек Восточной Сибири под влиянием лесовырубок // Исследования водных ресурсов Сибири. — Красноярск, 1985. — С. 34—43.
- Ефимова Н. А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 216 с.
- Жильцов А. С. Проникновение жидких осадков под полог леса и лесных полос в верхней части бассейна р. Уссури // Тр. ин-та / Биолог.-почв. ин-т. ДВНЦ АН СССР. Нов. сер. — 1973. — Т. 12(115). — С. 94—100.
- Жильцов А. С. Влагооборот в хвойно-широколиственных лесах и его изменение под действием сплошных рубок на западных склонах Южного Сихотэ-Алиня: Автoref. дис. . . канд. с.-х. наук. — Хабаровск, 1975. — 27 с.
- Жильцов А. С. Биогеоценологические исследования в лесах Южного Сихотэ-Алиня. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. — 143 с.
- Земцов В. А. Влияние физико-географических факторов на естественную зарегулированность стока рек Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1979. — Вып. 12. — С. 46—58.
- Иберар К. Факторный анализ. — М.: Статистика, 1980. — 397 с.
- Иванов Е. Е. Основы гидрологии болот лесной зоны. — Л.: Гидрометеоиздат, 1957. — 500 с.
- Идзон П. Ф., Пименова Г. С. Влияние леса на сток рек. — М.: Наука, 1975. — 112 с.
- Идзон П. Ф., Пименова Г. С., Цыганова О. П. Количественные характеристики водоохранной и водорегулирующей роли леса // Влияние леса на водные ресурсы. — М.: Наука, 1986. — С. 3—43.
- Изотов В. Ф. Ход накопления и таяния снега под пологом заболоченных лесов северной подзоны тайги // Метеорология и гидрология. — 1967. — № 11. — С. 86—91.
- Калинин Г. П. Роль леса в распределении осадков // Вопросы гидрометеорологической эффективности полезащитного лесоразведения. — Л.: Гидрометеоиздат, 1950. — С. 24—29.
- Капотов А. А. Исследование водного режима почвогрунтов зоны аэрации, их промерзания, водно-физических и инфильтрационных свойств // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1969. — Вып. 176. — С. 70—103.

- Капотова Н. И.** Исследование режима грунтовых вод в районах северо-запада ЕТС // Там же. — С. 51—69.
- Карасев М. С., Худяков Г. И.** Речные системы на примере Дальнего Востока // Тр. ин-та / Дальневост. н.-и. гидрометеорол. ин-т. — 1981. — Вып. 38. — 136 с.
- Качалова Т. В.** Испарение с внутриболотных озер центральной части Западно-Сибирской равнины // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1977. — Вып. 236. — С. 66—75.
- Кирилюк М. И.** Водный баланс водосборов горных рек Карпат // Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. — Л., 1976. — Т. 2: Водные ресурсы и водный баланс. — С. 192—198.
- Кирилюк М. И.** Водный баланс // Тепловой и водный режим Украинских Карпат. — Л., Гидрометеоиздат, 1985. — С. 202—218.
- Клинцов А. П.** Микроклиматическая и гидрологическая роль лесов Сахалина. — Южно-Сахалинск, 1969. — 180 с.
- Клинцов А. П.** Водный баланс березового леса и его вырубки на Южном Сахалине // Лесоведение. — 1971. — № 1. — С. 88—91.
- Козлова Л. Н.** Расход воды на транспирацию южной тайги (Кас-Енисейская равнина) // Защитная роль лесов Сибири. — Красноярск, 1980. — С. 46—61.
- Константинов А. Р.** Испарение в природе. — 2-е изд. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 532 с.
- Корень В. И.** Моделирование процессов формирования стока рек лесной зоны ЕТС // Метеорология и гидрология. — 1980. — № 10. — С. 78—85.
- Крестовский О. И.** Влияние рубок и восстановления лесов на водность рек. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 118 с.
- Крестовский О. И., Соколова Н. В.** Весенний сток и потери талых вод в лесу и в поле // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1980. — Вып. 265. — С. 32—60.
- Крестовский О. И., Хатькова Н. П.** Потери на заболоченных водосборах лесной зоны ЕТС и возможности их прогноза // Там же. — С. 74—82.
- Кузнецова Л. П.** Роль рельефа и лесов в распределении количества осадков на равнине // Тр. Гос. гидрол. обсерватории. — 1957. — Вып. 72. — С. 76—91.
- Кулаков В. В.** Изменение элементов водного баланса СССР в связи с возможным увлажнением засушливых районов // Глобальный водообмен. — М.: Наука, 1975. — С. 71—85.
- Куликов Ю. Н.** Формирование подземного стока в условиях олиготрофного заболачивания // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1970. — № 5. — С. 66—70.
- Ладейщикова Е. Н., Чеботарев Ю. А.** Структура водного баланса дерново-подзолистых почв в разных типах леса // География и природ. ресурсы. — 1984. — № 1. — С. 47—52.
- Ландшафты юга Восточной Сибири.** — М. 1 : 1 500 000. — М.: ГУГК, 1976.
- Лебедев А. В.** Водоохранное значение леса в бассейне Оби и Енисея. — М.: Наука, 1964. — 64 с.
- Лебедев А. В.** Водный и тепловой балансы природных комплексов речных бассейнов // Экологическое влияние леса на среду. — Красноярск, 1977. — С. 15—48.
- Лоули Д., Максвелл А.** Факторный анализ как статистический метод. — М.: Мир, 1967. — 144 с.
- Лучшев А. А.** Осадки под пологом леса // Тр. ин-та / Всесоюз. н.-и. ин-т лесн. хоз-ва. — 1940. — Вып. 18. — С. 113—148.
- Львович М. И.** О методике проектирования лесных полос на полях колхозов и совхозов // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1952. — Вып. 3. — С. 3—17.
- Львович М. И.** Человек и воды // Преобразование водного баланса и речного стока. — М.: Географиздат, 1963. — 556 с.
- Малинин В. Н.** О связи водных балансов атмосферы и подстилающей поверхности // География и природ. ресурсы. — 1984. — № 4. — С. 114—121.
- Мамай И. И.** Ландшафтные исследования при изучении стока // Ландшафтный сборник. — М.: Изд-во МГУ, 1973. — С. 190—206.
- Марунич С. В.** Структура потоков тепла, влаги и количества движения над лесом // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1973. — Вып. 207. — С. 99—112.
- Марунич С. В., Федоров С. Ф.** Изменение водного режима водосборов под влиянием лесохозяйственных мероприятий // Там же. — 1986. — Вып. 311. — С. 93—103.
- Материалы гидрометеорологических наблюдений на полевых и лесных парных водосборах.** — Л.: Гидрометеоиздат, 1969—1983. — Вып. 1—7, ч. 2, 3.

- Материалы наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции.** — М.: ГУГМС, 1975. — 195 с.
- Мельчанов В. А.** Влияние рубок на сток воды // Лесн. хоз-во, 1978. — № 7. — С. 34—36.
- Минин Н. К., Булатов В. И., Бураков Д. А.** Минимальный сток и его зависимость от ландшафтной структуры речных бассейнов // Природа и экономика Александровского нефтегазоносного района. — Томск, 1968. — С. 163—170.
- Михович А. И.** К установлению нормативов водоохранной лесистости территории Украинской ССР и Молдавской ССР. — Киев: Урожай, 1973. — С. 3—12.
- Многолетние характеристики гидрометеорологического режима в Подмосковье (Материалы наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции).** — М.: ИПГ, 1982. — Ч. 2. — 162 с.
- Мокляк В. И.** Общие основы построения формул максимальных расходов воды от талых вод // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. — М., 1959. — Т. 2. — С. 378—385.
- Молчанов А. А.** Гидрологическая роль леса. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 487 с.
- Молчанов А. А.** Суммарное испарение и транспирация в лесу и на безлесных площадках // Лес и воды. — М.: Географгиз, 1963. — С. 55—76.
- Молчанов А. А.** Влияние леса на окружающую среду. — М.: Наука, 1973. — 360 с.
- Молчанов А. А., Губарева В. А.** Взаимосвязи в лесном биогеоценозе. — М.: Наука, 1980. — 152 с.
- Молчанов А. А., Смирнов В. В.** Методика изучения прироста древесных растений. — М.: Наука, 1967. — 100 с.
- Огневский А. В.** Влияние леса на весенние максимальные расходы воды в реках // Метеорология и гидрология. — 1937. — № 3. — С. 47—59.
- Олийник В. С.** Особенности накопления и таяния снега в еловых лесах Карпат // Лесоведение. — 1979. — № 4. — С. 85—88.
- Олийник В. С., Парпан В. И., Чубатый О. В.** Пути совершенствования рубок главного пользования в лесах Карпат // Там же. — 1986. — № 3. — С. 19—24.
- Опритова Р. В.** Водоохранная роль лесов Южного Сихотэ-Алиня. — М.: Наука, 1978. — 96 с.
- Осипов В. К.** Вопросу о влиянии леса на распределение осадков // Лесоведение. — 1967. — № 4. — С. 76—80.
- Основные гидрологические характеристики.** — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — Т. 15, вып. 3. — 248 с.; 1979. — Т. 15, вып. 2. — 488 с.
- Панов В. И.** Водный баланс и эрозия на черноземах степного Заволжья: Автoref. дис. . . канд. с.-х. наук. — М., 1975. — 19 с.
- Перехрест С. М., Кочубей С. Г., Печковска О. М.** Шкідливі стихійні явища в Українських Карпатах та засоби боротьби з ними. — Київ: Наук. думка, 1971. — 200 с.
- Писаревский Х. А.** Водный режим ельников-черничников // Тр. ин-та / Ин-т леса АН СССР. — 1954. — Т. 22. — С. 141—152.
- Побединский А. В.** Влияние рубок на стокорегулирующую роль еловых лесов // Лесоведение. — 1971. — № 2. — С. 48—57.
- Побединский А. В.** Изменение защитной и водорегулирующей роли леса под влиянием рубок // Вопр. географии. — 1976. — Сб. 102. — С. 169—179.
- Побединский А. В.** Водоохранная и почвозащитная роль лесов. — М.: Лесн. пром-сть, 1979. — 176 с.
- Поздняков Л. К.** О методе учета испарения с поверхности почвы при экологических исследованиях // Почвенно-гидрологические исследования в лесу и лесных культурах. — М., 1963. — С. 32—36.
- Поздняков Л. К.** Лес на вечной мерзлоте. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. — 97 с.
- Пособие по определению основных гидрологических характеристик.** — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 447 с.
- Прилуцкий А. П.** Водно-физические свойства почв дубняков // Экология дуба монгольского в Приморье. — Владивосток, 1981. — С. 3—13.
- Протопопов В. В.** Средообразующая роль темнохвойного леса. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. — 327 с.
- Растительность Западно-Сибирской равнины. Кarta M 1:1 500 000.** — М.: ГУГК, 1976.
- Раунер Ю. Л.** К методике экспериментальных исследований теплового баланса лесных и безлесных ландшафтов // Тепловой баланс и радиационный баланс

- естественной растительности и сельскохозяйственных полей. — М.: Наука, 1965. — С. 7—22.
- Раунер Ю. Л.** Тепловой баланс растительного покрова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 206 с.
- Рахманов В. В.** Влияние лесов на формирование снегозапасов // Метеорология и гидрология. — 1956. — № 11. — С. 21—28.
- Рахманов В. В.** Водоохранная роль лесов. — М.: Гослесбумиздат, 1962. — 234 с.
- Рахманов В. В.** Водорегулирующая роль лесов // Тр. Гидрометцентра СССР. — 1975. — Вып. 153. — 192 с.
- Рахманов В. В.** Лесная гидрология // Лесоведение и лесоводство. — М.: ВИНИТИ. — 1981. — Т. 3. — 182 с. — (Итоги науки и техники).
- Рекомендации по созданию защитных лесных насаждений вдоль рек и вокруг водоемов.** — Киев, 1977. — 39 с.
- Роде А. А.** Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — Т. 1. — 664 с.
- Романов В. В.** Геофизика болот. — Л.: Гидрометеоиздат, 1961. — 359 с.
- Рубцов М. В., Братцева Н. Л.** Исследование водного режима лесных территорий и влияние на него рубки древостоев и лесовосстановления в таежных условиях европейского северо-востока СССР // Защитно-водоохраные леса. — М.: Гидрометеоиздат. Моск. отд-ние, 1977. — С. 52—58.
- Руководство воднобалансовым станциям.** — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 306 с.
- Румшинский Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 192 с.
- Серафимов В. Н.** Гидрологична роля на иглолистните гори в няком райони на Рила. — София: Българ. Акад. на наук, 1974. — 186 с.
- Скородумов А. С.** Водный режим суглинистых почв лесных насаждений степи и лесостепи // Почвоведение. — 1958. — № 3. — С. 67—75.
- Смаглюк К. К.** Оценка экологических последствий хозяйственного преобразования горных лесов Карпат // Лесоведение. — 1978. — № 2. — С. 3—9.
- Созыкин Н. Ф.** Влияние леса на водные свойства почв // Тр. ин-та / Всесоюз. н.-и. ин-т лесн. хоз-ва. — 1940. — Вып. 18. — С. 197—232.
- Созыкин Н. Ф., Горбунов Ю. В., Кожевникова С. А., Пятков П. П.** Некоторые результаты лесогидрологических наблюдений на Истринском опорном пункте ВНИИЛМ за период 1938—1957 гг. // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. — Л.: Гидрометеоиздат, 1959. — Т. 2. — С. 32—40.
- Соколов А. А.** О зональных и азональных факторах стока // Собрание работ по гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1961. — № 2. — С. 147—165.
- Соколов А. А.** О чем шумит русский лес. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 96 с.
- Соколовский Д. Л.** Речной сток. — Л.: Гидрометеоиздат, 1952. — 492 с.
- Соколовский Д. Л.** Нормы максимального стока весенних паводков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1959. — 527 с.
- Солнцев Н. А.** Природно-географические районы Московской области // Вопр. географии. — 1961. — Сб. 51. — С. 5—19.
- Солнцев Н. А., Мамай И. И., Маркус Я. А.** Ландшафтные исследования речных бассейнов для гидрологических целей // Там же. — 1976. — Сб. 102. — С. 75—92.
- Сочава В. Б.** Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. — 319 с.
- Сочава В. Б.** Географические аспекты сибирской тайги. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. — 256 с.
- Справочник по климату СССР.** — Куйбышев: Приволжское УГКС, 1969. — Вып. 12 (доп. к ч. 4).
- Субботин А. И.** Сток талых и дождевых вод (по экспериментальным данным). — М.: Гидрометеоиздат. Моск. отд-ние, 1966. — 373 с.
- Субботин А. И.** Структура половодья и территориальные прогнозы весеннего стока рек в Нечерноземной зоне европейской территории СССР / Под ред. Н. Ф. Дементьева. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 98 с.
- Субботин А. И.** О ландшафтном направлении в гидрологии // Вод. ресурсы. — 1983. — № 6. — С. 42—50.
- Субботин А. И., Воронков Н. А., Кожевников С. А., Шомполова В. А.** Весенний сток с лесных и безлесных водосборов специализированных станций и парных бас-

сейнов Международного гидрологического десятилетия в лесной зоне ЕТС. — Обнинск: ОНТИ, 1971. — 51 с.

**Сурмач Г. П.** О роли лесных полос в комплексе противоэрзационных мероприятий // Вопросы антропогенных изменений водных ресурсов. — М.: Гидрометеоиздат. Моск. отд-ние, 1976а. — С. 64—84.

**Сурмач Г. П.** Водная эрозия и борьба с ней. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976б. — 254 с.

**Сухарев И. П.** Гидрологическая и противоэрзационная роль лесных полос. — Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд-во, 1966. — 120 с.

**Тарапонов В. И.** Гидрологический режим хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. — Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1970. — 120 с.

**Тарапонов В. И.** Микроклимат лесов Южного Приморья. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. — 221 с.

**Тарапонов В. И., Волков В. Н., Жильцов А. С.** Поверхностный сток в горных лесах Приморского края // Использование и воспроизводство лесных ресурсов Дальнего Востока. — Хабаровск, 1972. — С. 63—66.

**Тарапонова Т. И.** Гидрологический режим кедровников Южного Приморья // Комплексные стационарные исследования лесов Приморья. — Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1967. — С. 91—102.

**Тарапонова Т. И.** К вопросу о водоохранном значении кедровых лесов Южного Приморья // Гидроклиматические исследования в лесах советского Дальнего Востока. — Владивосток, 1973. — С. 130—136.

**Троицкий В. А., Жернова М. Н.** Влияние леса на поверхностный сток // Тр. ин-та / Всесоюз. н.-и. ин-т лесн. хоз-ва. — 1939. — Вып. 8. — С. 45—94.

**Трубихин Н. А.** Двумерная модель формирования дождевого паводка // Метеорология и гидрология. — 1983. — № 7. — С. 94—100.

**Федоров С. Ф.** Испарение с леса при различном составе насаждений // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1967. — Вып. 142. — С. 62—71.

**Федоров С. Ф.** Исследование элементов водного баланса в лесной зоне европейской территории СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 264 с.

**Федоров С. Ф., Марунич С. В.** Оценка изменений элементов водного баланса в хвойных лесах под влиянием лесохозяйственных мероприятий // Организация экосистем южной тайги. — М., 1979. — С. 185—193.

**Федоров С. Ф., Марунич С. В.** Гидрологическая роль леса. Обзорная информация. — Обнинск: ВНИИГМИ МЦД, 1985. — Вып. 2. — 42 с.

**Федоров С. Ф., Марунич С. В., Буров А. С., Ральцевич Н. Д.** Изменение структуры водного и теплового баланса залесенных территорий под влиянием вырубок // Тр. ин-та / Гос. гидрол. ин-т. — 1981. — Вып. 279. — С. 20—31.

**Форсайт Дж.** Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир, 1980. — 279 с.

**Ханбеков Р. И., Письмеров А. В.** Стокорегулирующая роль темнохвойных и лиственных молодняков // Изменение водоохранно-защитной функции лесов под влиянием лесохозяйственных мероприятий. — Пушкино, 1973. — С. 17—24.

**Харитонов Г. А.** Лесомелиорация водных угодий // Лесная промышленность. — М., 1976. — 169 с.

**Чеботарев Ю. А.** Модель формирования дождевых паводков на малых лесных водосборах // Докл. ВАСХНИЛ. — 1981. — № 3. — С. 47—48.

**Чеботарев Ю. А.** Модель формирования дождевых паводков на малых лесных водосборах // Вестн. с.-х. науки. — 1982. — № 10. — С. 110—118.

**Чеботарев Ю. А.** Динамико-стохастическая модель водного баланса почвы // Метеорология и гидрология. — 1983. — № 10. — С. 86—93.

**Чеботарев Ю. А.** Подход к динамико-стохастическому моделированию дождевого стока // Моделирование процессов гидросфера, атмосфера и ближнего космоса. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. — С. 94—101.

**Чеботарев Ю. А., Соловьев И. Н.** Изучение влагооборота в почве // География и природ. ресурсы. — 1986. — № 3. — С. 131—136.

**Чешев Л. С., Черных З. И.** Изменение условий среды на сплошных узкополосных вырубках в еловых лесах Тянь-Шаня // Лесоведение. — 1977. — № 1. — С. 19—26.

**Чижмакова Т. Н.** Учет влияния лесистости водосборов на слой стока за половодье // Тр. Центр. высот. гидрометеобсерватории. — 1973. — Вып. 2. — С. 65—76.

**Чубатый О. В.** Захисна роль карпатських лісів. — Ужгород: Карпати, 1968. — 136 с.

- Чубатый О. В. Водоохоронні гірські ліси. — Ужгород: Карпати, 1972. — 120 с.
- Чубатый О. В. Влияние рубок леса на паводочный сток в Карпатах (на примере буковых лесов) // Вод. ресурсы. — 1981. — № 1. — С. 48—55.
- Чубатый О. В. Гірські ліси — регуляторы водного режиму. — Ужгород: Карпати, 1984а. — 104 с.
- Чубатый О. В. Формирование водного баланса водохранилищ в связи с возрастом буковых лесов Карпат // Лесоведение. — 1984б. — № 1. — С. 3—7.
- Чубатый О. В., Олийник В. С. Влияние леса на водность рек Карпат (на примере верховьев р. Рика) // Вод. ресурсы. — 1976. — № 4. — С. 50—57.
- Швебс Г. И. Контурное земледелие. — Одесса: Маяк, 1985. — 55 с.
- Швебс Г. И., Васютинская Т. Д., Антонова С. А. Долинно-речные парагенетические ландшафты // География и природ. ресурсы. — 1982. — № 1. — С. 24—32.
- Широков В. М. Особенности формирования стока в бассейне р. Сок // Изв Казан. фил. АН СССР. Сер.энергетики и водн. хоз-ва. — 1957. — Вып. 1. — С. 181—185.
- Шпак И. С. Влияние леса на водный баланс водохранилищ. — Киев: Наук. думка, 1968. — 284 с.
- Шпак И. С., Булавская Т. Н. Распределение снежного покрова и высотные градиенты осадков и снегозапасов в районе Закарпатской стоковой станции // Тр. ин-та / Укр. н.-и. гидрометеорол. ин-т. — 1967. — Вып. 66. — С. 59—69.
- Bac S. Rola lesu w balansie wodnym Rolski // Folia Forest, Pol. Ser. A. — 1968. — Z. 14.
- Garczynski F. Influence du taux de boisement sur le régime hydrologique dans trois régions des U. S. A. // Intern. Symp. on the Influence of man on the Hydrological Regime. — Helsinki: UNESCO-JAHS, 1980. — P. 1—11.
- Imhoff K. R. Wald und Wasser // Allgemeine Forstzeitsehrift. — 1982. — N 45. — S. 1353—1355.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (А. Н. Антипов)	3
<b>Глава 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	
1.1. Исторические и методические аспекты исследований (А. Н. Антипов, С. Ф. Федоров, С. В. Марунич)	7
1.2. Опыт применения ландшафтного принципа оценки влияния леса на весенний сток (Я. А. Маркус, Л. Т. Павлушкин)	19
1.3. Моделирование гидрологических процессов на малых лесных водосборах (Ю. А. Чеботарев)	27
1.4. Учет лесистости при моделировании водного баланса в системе атмосфера — поверхность суши (В. Н. Малинин)	35
1.5. Методы учета влияния лесохозяйственных мероприятий на сток малых рек (В. Е. Водогрецкий)	44
1.6. Статистические методы оценки влияния лесовырубок на сток малых рек (Л. М. Ершова, А. В. Петенков)	51
<b>Глава 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ РАЗНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗОН</b>	56
2.1. Формирование стока на малых водосборах в средней тайге европейского Севера (М. В. Рубцов, А. А. Дерюгин, Ю. Н. Салмина)	56
2.2. Влияние леса на слой стока весеннего половодья рек Украины (М. Е. Романчук)	66
2.3. Водоохранная и водорегулирующая роль горных лесов Карпат (В. С. Олийник)	73
2.4. Влияние факторов подстилающей поверхности на формирование максимального стока половодья рек Западно-Сибирской равнины (Е. Д. Гонченко, Н. Г. Сербов)	80
2.5. Индикационные свойства лесного покрова в расчетах подземного питания водотоков (Е. В. Трофимова)	86
2.6. Гидрологические характеристики геосистем бассейна р. Селенги (В. Н. Федоров)	89
2.7. Водоохранно-защитная роль хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья (А. С. Жильцов)	97
<b>Глава 3. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ</b>	102
3.1. Влияние лесохозяйственных мероприятий на изменение водохранной и почвозащитной роли лесов (А. В. Побединский)	102

3.2. Влияние рубок леса на соотношение элементов водного и теплового баланса лесных геосистем южной тайги ЕТС (С. В. Марунич, С. Ф. Федоров) . . . . .	109
3.3. Изменение составляющих водного баланса в связи со сплошными рубками в северо-таежных лесах (В. А. Анисеева, Н. И. Курбак) . . . . .	118
3.4. Водорегулирующая и водоохранная роль нарушенных горных лесов (В. С. Олийник) . . . . .	124
<b>Г л а в а 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕСНЫХ ГЕОСИСТЕМ В ПРАКТИКЕ . . . . .</b>	<b>131</b>
4.1. Пополнение запасов артезианских вод с помощью лесов (В. В. Рахманов) . . . . .	131
4.2. Ландшафтно-гидрологические основы проектирования водоохраных полос (Г. И. Швебс, Т. Д. Борисевич) . . . . .	140
4.3. Гидрологическая роль защитных лесных насаждений (И. К. Зыков, В. И. Панов) . . . . .	145
<b>Заключение (А. Н. Антипов)</b> . . . . .	<b>154</b>
<b>Список литературы</b> . . . . .	<b>158</b>