

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

СООБЩЕНИЯ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

А.М.ТАРКО, А.Л.ДРОЗДОВ, Е.И.КОНОВАЛОВА,
Н.Ф.ПИСАРЕНКО, Ф.А.ТАТАРИНОВ

**МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ
КИСЛОТНЫХ ДОЖДЕЙ НА
ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ**



ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР АН СССР
МОСКВА 1988

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие производства в последние десятилетия возвело защиту окружающей среды в ранг важнейшей социально-экономической проблемы. В большинстве промышленно развитых стран многие естественные экосистемы испытывают стрессовые воздействия индустриальных выбросов токсичных веществ. Так наиболее распространенными источниками загрязнения атмосферы являются комплексные выбросы металлургических комбинатов, окислы серы и кислотные дожди. В странах центральной и северной Европы и на востоке США подобные загрязнения привели к гибели или повреждению лесов на обширных территориях. Последнее объясняется особенностью данного вида загрязнений: способностью распространяться на значительные расстояния от источника выбросов. Особенно велика площадь, поражаемая кислотными дождями.

Кислотные дожди образуются в атмосфере в результате окисления соединений серы и азота, которые выделяются в основном при сжигании ископаемых органических топлив. Развитие топливно-энергетической базы северо-западных районов СССР придает исследованию процессов распространения кислотных дождей, а также двуокиси серы в атмосфере и их воздействию на растительность важное народнохозяйственное значение.

В связи с этим возникает ряд задач математического характера. Такой задачей является, например, моделирование распространения загрязнений от заданного источника, дающее возможность определять зоны воздействия вредных выбросов. Актуальна и обратная задача: определение источника по данным о распространении загрязнений на некоторой территории. Одной из важнейших задач является математическое моделирование воздействия загрязнений на естественные экосистемы. Такие модели могут использоваться для оценки устойчивости экосистем к воздействию загрязнений различной концентрации и для выработки рациональных норм промышленных выбросов.

Целью данной работы является моделирование биогеохимического круговорота азота и серы в лесных экосистемах с учетом воздействия кислотных дождей и двуокиси серы. Рассмотрение циклов этих двух элементов представляется наиболее интересным потому, что, с одной стороны, круговорот азота полностью отражает динамику биомассы экосистемы - он вместе с углеродом служит основным материалом построения растительных белков, - а с другой стороны, именно азот и сера в виде химических соединений поступают в растения и почву из атмосферы и с кислотными дождями. Таким образом, в настоящей работе изложена математическая модель, описывающая динамику лесной экосистемы в условиях антропогенных выбросов азота и серы в атмосферу.

ВОЗДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗИТЕЛЕЙ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В последние годы весь комплекс проблем, связанных с загрязнением воздушной среды и его воздействием на растительные сообщества интенсивно изучается как в СССР, так и за рубежом.

Достаточно подробно изучены вопросы, связанные с распространением в атмосфере и удалением из нее загрязняющих веществ

[1, 2]. Характерное расстояние, на которое распространяются в атмосфере окислы азота и серы, 0-500 км. Это связано с тем, что среднее время их "жизни" в атмосфере порядка нескольких десятков часов. При этом основные процессы, обеспечивающие выведение из атмосферы соединений серы и азота, следующие [1]:

окисление SO_2 до SO_4^{2-} ;

окисление NO и NO_2 до N_2O_5 ;

"вымывание" SO_2 , SO_4^{2-} , NO_x , NO_3 с осадками;

"сухое" поглощение их подстилающей поверхностью, с одновременным окислением SO_2 до SO_4^{2-} и NO_x до N_2O_5 .

В работе [1] построена математическая модель, описывающая переход серы и азота из формы окислов в форму кислот /закисление осадков окислами серы и азота/. В [3] описан глобальный круговорот азота и серы, приводится его общая схема и величины основных потоков.

Необходимо отметить, что в наибольшей степени /на 60%/ закислению осадков способствует SO_4^{2-} [1], поскольку выпадение серы с осадками /на суше/ в четыре раза превосходит выпадение азота [2].

Сера может поступать в растение двумя путями: из атмосферы через устьица в виде SO_2 и из почвы в виде SO_4^{2-} .

При этом увеличение притока серы в виде SO_2 приводит к

перестройке метаболизма клеток, в результате чего поступление серы из почвы уменьшается [4, 5]. После проникновения в растение двуокись серы участвует в реакциях, изображенных на рис. I.

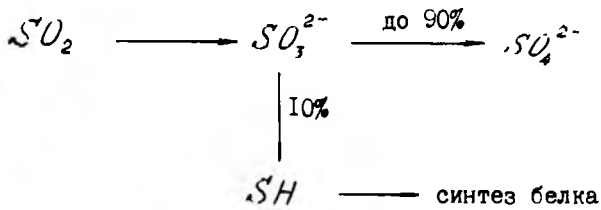


Рис. I.

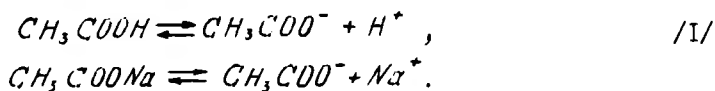
Схема превращений двуокиси серы при попадании в растение.

При этом ионы SO_3^{2-} оказывают ингибирующее воздействие на различные процессы, происходящие в фотосинтезирующих клетках. При малых концентрациях SO_2 происходят обратимые изменения метаболизма, ингибирование синтеза жирных кислот, прерывание транспорта электронов. Все это приводит к резкому уменьшению фотосинтеза без изменения структуры клеток. В работе [1] описана математическая модель воздействия малых концентраций SO_2 на метаболизм фотосинтезирующей клетки. При более высоких концентрациях двуокиси серы происходит повреждение клеток, замыкающих устьица, они открываются [6], и в результате резко возрастает транспирация, а следовательно, и приток токсикантов, что еще больше увеличивает повреждения. При очень высоких концентрациях SO_2 в воздухе /например, для цветковых растений свыше 0,0001 % [6] /начинается отмирание участков листа. Наиболее чувствительны к воздействию атмосферных загрязнений мхи и лишайники [3], более устойчивы хвойные, и самыми устойчивыми являются цветковые растения.

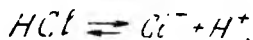
Результаты опытов по изучению влияния различных внешних факторов на степень повреждения растений подробно изложены в работе [3].

Вопрос о воздействии закисления почв на рост растений изучен пока в меньшей степени. Остановимся на некоторых происходящих при этом процессах. Прежде всего все почвы обладают большей или меньшей буферностью, т.е. способностью частично нейтрализовывать поступающие в почву кислоты [7].

Приведем пример работы простейшей буферной системы - раствора слабой кислоты и ее соли. Пусть имеется раствор уксусной кислоты CH_3COOH и ее соли, ацетата натрия CH_3COONa . Запишем химические реакции диссоциации кислоты и соли в растворе:



Уксусная кислота представляет собой слабую кислоту с константой диссоциации $k_o = 1,86 \cdot 10^{-5}$, а ацетат натрия сильно диссоциирует. Пусть в раствор добавлено некоторое количество сильной кислоты, например, соляной, которая сильно диссоциирует с образованием ионов водорода и хлора:



Образовавшиеся в результате диссоциации сильной кислоты ионы водорода будут связываться анионами CH_3COO^- в малодиссоциированную уксусную кислоту, в результате чего количество ионов водорода в растворе увеличится незначительно. Следовательно, pH раствора также изменится незначительно. Источником анионов CH_3COO^- является раствор соли.

Обозначим молярные концентрации уксусной кислоты и ацетата натрия, помещенные первоначально в раствор, через C_4 и C_5 . Обозначим через C количество полностью продиссоциированной

сильной кислоты, прилитой в раствор. Обозначим молярные концентрации вещества после установления химического равновесия в растворе: y - анионов кислоты CH_2COO^- ,
 z - ионов водорода H^+ ,
 z_{Na} - ионов Na^+ .

Запишем закон действующих масс для уравнений /1/ в виде:

$$[CH_2COOH] = K, [CH_2COO^-] [H^+],$$

$$[CH_2COONa] = k_2 [CH_2COO^-] [Na^+],$$

откуда получим уравнения:

$$x_K = k_1 y / z ; \quad x_S = k_2 y z_{Na} . \quad /2/$$

Выпишем условия сохранения вещества в растворе до и после химической реакции:

$$1/ \text{ ионов натрия: } c_S = x_S + z_{Na} , \quad /3/$$

$$2/ \text{ анионов кислоты: } c_K + x_S = c_K + x_S + y$$

$$3/ \text{ ионов водорода: } c_H + c = c_H + z .$$

Таким образом, мы получили систему пяти уравнений /2/ и /3/ с пятью неизвестными x_K , x_S , c , y , z_{Na} . Можно показать, что существует единственное ненулевое решение этой системы.

Система /2/, /3/ решалась численно на ЭВМ. Типичная расчетная кривая зависимости pH буферного раствора от количества прилитой сильной кислоты показана на рис. 2. Видно, что при малых концентрациях сильной кислоты pH раствора изменяется незначительно. При некотором увеличении концентрации кислоты происходит резкое уменьшение pH раствора. Затем pH стабилизируется на низком уровне. Варьирование при расчетах значений c_K и c_S показало, что критическое значение c^* , при котором происходит резкое уменьшение pH раствора, близко к молярной концентрации соли, первоначально находившейся в растворе. Это означает, что буферность раствора в значительной степени определяется количеством соли.

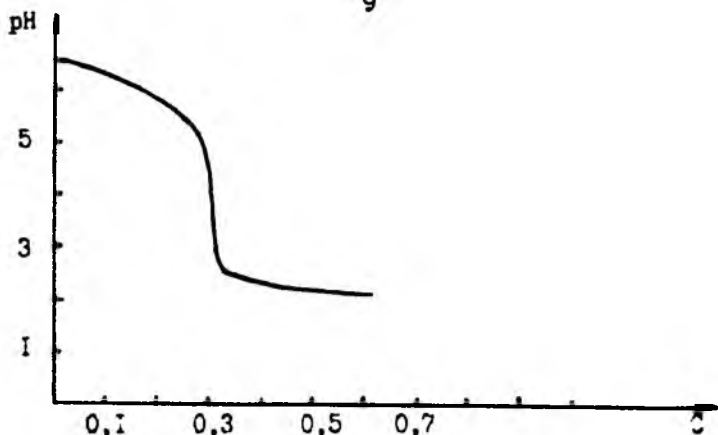


Рис. 2.

Зависимость pH буферного раствора от количества поступившей сильной кислоты: C - молярная концентрация кислоты, $C_S = 0,3$.

Почвенный раствор содержит много солей с разными коэффициентами диссоциации и несколько буферных систем с более сложными механизмами буферности. Теоретически при очень большом поступлении кислот буферные свойства почвы могут быть полностью разрушены /pH почвы будет совпадать с pH поступающей кислоты/, однако в реальных почвах при реальных значениях этого не наблюдается.

Подробно влияние изменений состояния почвы при закислении на растения рассмотрено в работе [8]. Закисление почвы изменяет доступность ионов металлов. Доступность Cu и Mn резко уменьшается / Cu , в частности, связывается в трудно-растворимую соль $CuSO_4$ /, но значительно увеличивается содержание ионов Fe , Zn , Mn , которые в больших количествах становятся токсичными для растений. В результате уменьшается клеточное дыхание, нарушается транспорт некоторых ионов и воды. Особенно сильно страдает корневая система: корни пе-

рестают расти, утолщаются и ослизняются.

Различные виды растений имеют различные пределы толерантности по кислотности почвы [9]. Среди древесных растений наиболее устойчивы к закислению хвойные /минимальное значение pH для них порядка 3,5-3,9/, в меньшей степени - мелколиственные породы. Широколиственные породы обычно растут на нейтральных почвах и закисление переносят плохо.

Следует отметить, что не только кислотность почвы влияет на состояние растений, но и растения способны менять кислотность почвы, причем в довольно значительной степени. Результаты опытов, проводившихся для выяснения степени влияния растений на кислотность почв, описаны в работе [2].

Следует отметить, что существуют различные точки зрения о направлениях и пределах изменения кислотности почв растительностью. Мы придерживались при разработке модели той гипотезы, что хвойные породы практически при любом начальном значении pH способствуют по мере роста закислению почвы.

МОДЕЛЬ КРУГОВОРОТА СЕРЫ И АЗОТА В ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Излагаемая модель описывает круговорот азота и серы в лесной экосистеме. Лесная растительность рассматривается как одновидовой, разновозрастный древостой. Роль травяного покрова в круговороте азота незначительна, поэтому в модели он не рассматривается. Блок-схема модели изображена на рис. 3. Содержание азота и серы во всех уровнях рассчитывается на единицу площади.

Из газообразных соединений серы, поступающих в экосистему, токсическое и ингибирующее действие на растения оказывает толь-

ко SO_2 . Поскольку большинство почв не являются дефицитными по сере, содержание серы в почве можно не учитывать. Под содержанием серы в хвое будем понимать только содержание неорганической серы.

Будем обозначать содержание азота на соответствующих уровнях/см.рис.3/ через N_i , содержание неорганической серы в зеленой фитомассе - через S_i . Скорость перехода азота с i -го уровня на j -й обозначим через K_{ij} . Внешними переменными в модели являются: концентрация SO_2 в воздухе - S_{SO_2} /мг серы на 1 м^3 воздуха/; поток H_2SO_4 в почву из атмосферы и поток HNO_3 , а также поток ионов NH_4 на 1 м^2 почвы.

Согласно [1], потоки серы, азота и ионов водорода в почву будем вычислять следующим образом:

$$R_S = (K_{1S} S_{SO_2} + K_{2S} S_{SO_4}) \cdot h,$$

$$R_N = (K_{1N} N_{O_2} + K_{2N} N_{NO_2}) \cdot h,$$

$$R_{NH} = \gamma_S R_S + \gamma_N (R_N - R_{NH_4}) + R_0,$$

где K_{1S} , K_{1N} , K_{2S} , γ_S , γ_N , R_0 - коэффициенты, $h = 1000 \text{ м}$ - характерная толщина слоя воздуха, в котором данные ингредиенты присутствуют в заметных количествах; S_{SO_2} , NO_2 , N_{NO_2} - соответственно обозначают концентрации в атмосфере ионов SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- . Введем также следующие вспомогательные переменные: $pH = -\lg(H)$ - стандартная единица измерения кислотности среды, а также $\xi_i = \rho \cdot N_i \frac{S_i}{N_i}$ - концентрация серы в хвое /здесь N_{NH} - доля азота в хвое, ρ - удельный вес хвои/.

Прежде, чем перейти к описанию модели, изобразим краткую схему влияний /рис.4/. На схеме знак у стрелки указывает направление изменения переменной, к которой адресована стрелка, под действием того фактора, откуда она исходит.

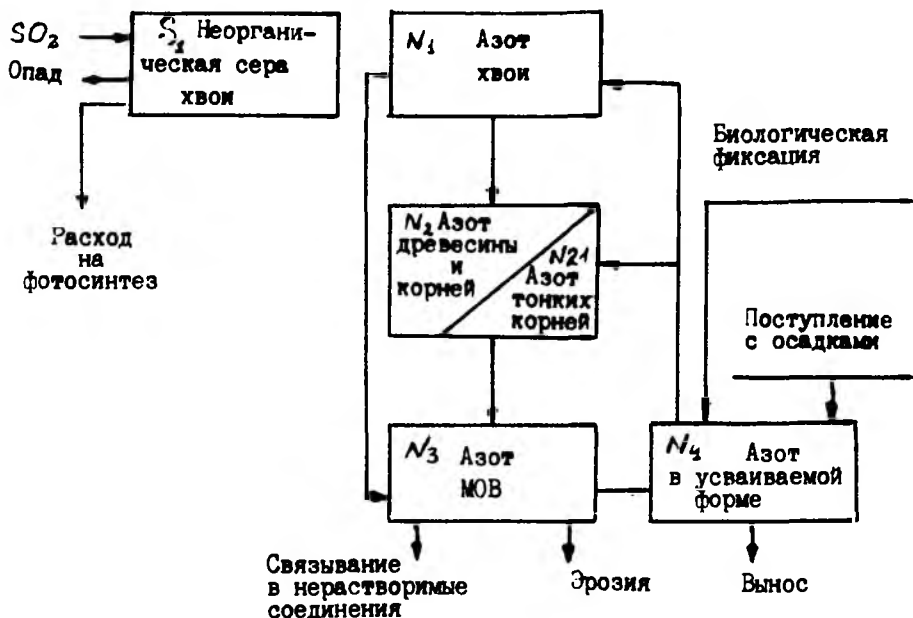


Рис. 3.

Блок-схема модели: МОВ - мертвое органическое вещество.

Приведем выражения для потоков экосистемы. Прирост органического вещества, выраженный в массе азота, предполагается равным разности фотосинтеза и дыхания. Фотосинтез задается соотношением:

$$F' = f(F_0, S_e, z_{se}) \cdot f_N(N_4) g_f(\xi_2) \quad 14/$$

Функция $f(F_0, S_e, z_{se})$, согласно [10], задается следующим выражением:

$$f = \left(\frac{1}{F_0} + \frac{1}{\psi_f \alpha_f l_f} + \frac{z + z_{se}}{C_A} \right)^{-1} S_e$$

Здесь $F_0 = \text{const}$; l_f - интенсивность фотосинтетически активной радиации /ФАР/ и C_A - концентрация CO_2 в воздухе приняты в модели постоянными; α_f - угол наклона световой кривой фотосинтеза; ψ_f - коэффициент усвоения ФАР, z - сопротивле-

ние мезофила /const /, γ_{st} - устьичное сопротивление листа, S_L - эффективная площадь листьев - вычисляется по формуле:

$$S_L = (K_p \cdot N) / (N + N_{IN}), \text{ где}$$

N_{IN} , K_p - коэффициенты.

Введение зависимости фотосинтеза от устьичного сопро-

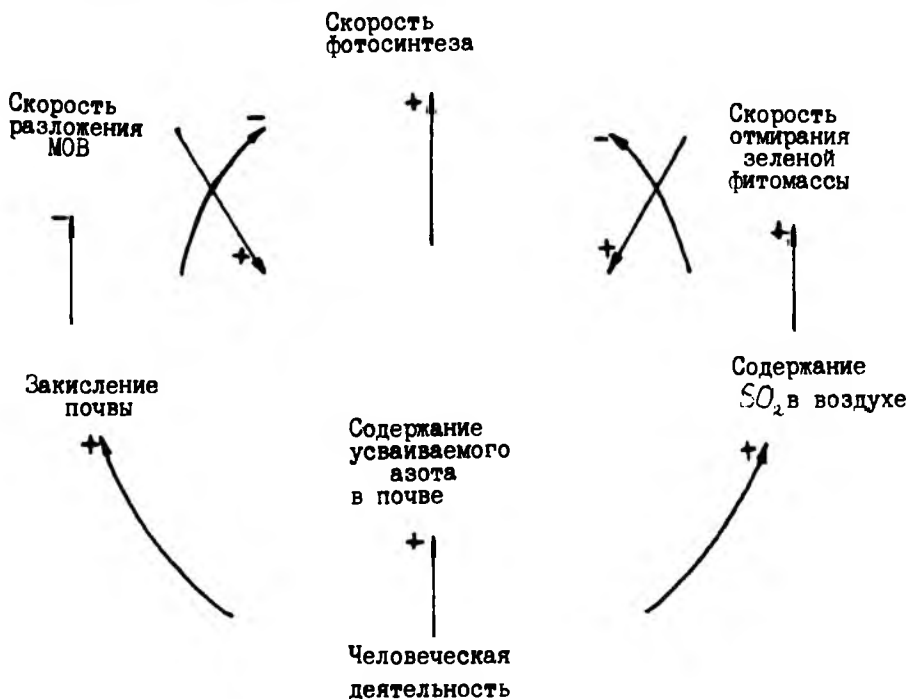


Рис. 4.

Схема основных влияний модели.

тивления листа дает возможность учитывать водный режим растения, что позволяет воспроизвести в модели собственно механизм воздействия закисления почвы на фотосинтез. Предполагая равенство потоков воды через структурные части растения, для ψ_L , ψ_K , ψ_S - водных потенциалов листьев, корней и почвы соот-

ответственно, можно выписать следующие уравнения, предложенные в [7]:

$$k_{rs} S_k (\psi_k - \psi_s) = k_{re} (\psi_e - \psi_r) = \frac{S_e \alpha}{z_{s,e} z'}; \quad /5/$$

где $z_{se}(\psi_e) = z_{s,e} \frac{\psi_m - \delta \psi_e}{\psi_m - \psi_e}$ - эмпирически установленная зависимость [10]. Здесь S_k - площадь тонких корней; S_e - площадь листьев, k_{rs} , k_{re} , α , z' , $z_{s,e}$, ψ_m , δ - постоянные.

Уравнения /5/ дают зависимость устьичного сопротивления от водного потенциала почвы, который, в свою очередь, зависит от pH.

В нашей модели использовалась упрощенная формула зависимости устьичного сопротивления от S_e , S_k , pH , построенная по численным данным, полученным из /5/ и экспериментальным данным, приведенным в работах [1, 10]:

$$z_{st} = \begin{cases} \frac{z_{sa}}{pH - k_2 \cdot N_1 / N_{21}} \cdot \left(1 - A_2 \frac{S_{SO_2}}{S_{SO_2}^*}\right), & S_{SO_2} < S_{SO_2}^* \\ 500, & S_{SO_2} \geq S_{SO_2}^* \end{cases}$$

Причем $c \frac{S_e}{S_k} = k_2 \cdot \frac{N_1}{N_{21}}$ ($c = const$), z_{sa} , k_2 , A_2 - коэффициенты, $S_{SO_2}^*$ - постоянная.

$f_N(N_4)$ в формуле /4/ - трофическая функция следующего вида:

$$f_N = \min(\max(1 + \gamma \cdot (N_4^0 - 1), 0), f_{max})$$

f_{max} , $\gamma = const$, N_4^0 - начальное значение переменной N_4 ,

$g_F(\xi_1)$ - функция, учитывающая ингибирование фотосинтеза за счет накопления неорганической серы в хвое. Она имеет следующий вид:

$$g_F = \max\left(1 - \left(\frac{\xi_1 - \xi_0}{\xi_{Fg} - \xi_0}\right)^{n_g}, 0\right).$$

Здесь n_g , ξ_{Fg} - постоянные, ξ_0 - начальное значение переменной ξ_1 .

В модели рассматривалось только дыхание поддержания, которое считалось пропорциональным общей биомассе. Именно этот вид дыхания становится наиболее существенным при значительном

снижении фотосинтеза. Таким образом, дыхание имеет вид

$$P = K_D (N_1 + N_2)$$

Долю ассимилятов, идущих в хвою, задает функция $\alpha = \alpha(t)$ $/0 < \alpha < 1/$, отражающая естественную динамику распределения ассимилятов в зависимости от возраста растения. Ее конкретный вид получен в результате аппроксимации с помощью кубической параболы по экспериментальным данным, взятым из работы [II]:

$$\alpha = \min(\max(0,63, a t^3 + b t^2 + c t + d), 0,82), /10/$$

где a, b, c, d - постоянные, t - физическое время, отсчитываемое от начала роста древостоя. Также проводились расчеты, в которых аргументом функции α было биологическое время, зависящее от N_2 : $\alpha = \alpha(N_2)$.

Таким образом, потоки азота в хвою и древесину имеют вид:

$$R_{41} = \alpha (F - P),$$

$$R_{42} = (1 - \alpha) (F - P).$$

Поток R_{13} , выражающий отмирание хвои, зададим в виде суммы двух членов:

$$R_{13} = m_1 (\xi_1) N_1 + m_5 (R_H) N_1.$$

Первый член означает естественное отмирание хвои. Здесь

$m_1(\xi_1) = m_1^0 g m(\xi_1)$, где $g m(\xi_1)$ задается формулой:

$$g m(\xi_1) = \begin{cases} 1 + a m_1 \left(\frac{\xi_1 - \xi_c}{\xi_{mg} - \xi_c} \right)^{n_m}, & \xi_1 \geq \xi_c \\ 1, & \xi_1 < \xi_c. \end{cases}$$

$a m_1, \xi_{mg}, n_m$ - постоянные.

Функция $m_5(R_H)$ описывает некроз хвои от прямого действия кислот и имеет вид:

$$m_5(R_H) = \max\left(m_5^0 \left(\frac{R_H}{R_{HMIN}} - 1\right), 0\right),$$

m_5^0 - коэффициент.

Удельная скорость отмирания древесины бралась в модели постоянной, поэтому соответствующий поток имеет вид:

$$R_{23} = m_2 N_2 .$$

Остановимся на описании потоков азота в тонкие корни и из них. Ввиду того что доля тонких корней в биомассе древесины сравнительно мала, то вклад прироста тонких корней в прирост древесины и корней также незначителен. На основании этого будем считать, что изменение N_{21} в явном виде не влияет на изменение N_2 . Поток азота в тонкие корни составляет часть потока азота в древесину, равную доле тонких корней в биомассе древесины и корней:

$$R_{42}^* = (1 - \alpha) (E' - P) \frac{N_{21}}{N_2} .$$

Отмирание тонких корней задается формулой:

$$m_{21}(\rho H) = m_{21}^0 (1 + \varphi(\rho H)) ,$$

где $m_{21}^0 = \text{const}$, $\varphi(\rho H) = \max(0, E' - x \cdot \rho H)$.

Переход тонких корней в толстые пропорционален $\frac{dN_{21}}{dt} x$,

P - коэффициент пропорциональности.

Рассмотрим теперь потоки, связанные с выходом азота из МОВ. Скорость разложения МОВ считается зависящей от ρH :

$$R_{34} = m_3^0 Q_3(\rho H) ,$$

где $Q_3(\rho H) = 1 - \alpha_3(\rho H - \rho H_0)$,

m_3^0 ; α_3 - коэффициенты; ρH_0 - начальное значение ρH .

Кроме R_{34} , введем два выхода азота МОВ из системы:

$m_a(\rho H) \cdot N_3$ и $m_g(N_2) \cdot N_3$. Поток $m_a \cdot N_3$ характеризует связывание азота гумуса в нерастворимые соединения при сильном закислении почвы. Функция $m_a(\rho H)$ имеет вид:

$$m_a = \max \left(m_a^0 \left(1 - \frac{\rho H - P_{\text{нмин}}}{\rho H_u - P_{\text{нмин}}} \right), 0 \right) ,$$

m_a^0 , ρH_u , $P_{\text{нмин}}$ - постоянные.

Поток $m_g(N_2) \cdot N_3$ характеризует эрозию почвы при уничтожении леса. Функция $m_g(N_2)$ задается аналогично функции $m_a(\rho H)$:

$$m_s = \max \left(m_s^0 \left(1 - \frac{N_2}{N_{2\text{MIN}}} \right), 0 \right); \quad m_s^0, N_{2\text{MIN}} - \text{постоянные.}$$

Удельную скорость вымывания азота в усваиваемой форме будем считать постоянной. Тогда соответствующий поток равен:

$$R_4 = m_4 N_4.$$

Скорость микробиологической фиксации азота N_{FIX} считалась постоянной.

Рассмотрим баланс серы в хвое. Согласно [8, 10], считаем поглощение SO_2 хвоей прямо пропорциональным разности концентраций SO_2 в атмосфере и неорганической серы в растении и обратно пропорциональным устьичному сопротивлению. Тогда соответствующий поток будет равен:

$$R_{SO_2} = \frac{K_s (S_{SO_2} - x_{s1}) N_1}{z_{ss}}$$

Выходной поток неорганической серы из хвои будет определяться ее расходом на фотосинтез и опадом. Если концентрация серы в хвое не превышала нормальной $\frac{1}{z_s} < \frac{1}{z_0}$ / и выходные потоки серы были больше, чем входной поток, то принималось, что все недостающее количество серы поступает из почвы.

Динамика показателя pH задавалась следующим уравнением, учитывающим буферность почвы, а также тот факт, что присутствует постоянный приток и отток ионов H^+ :

$$pH = pH_0 - (b_1 p^2(t)) / (1 + b_2 p^2(t)),$$

$$\text{причем } p(t) = \max \left(0, \int_0^t (R_H - m_H H - R_0 + K_{pH} (H_{MFN} - H) N_1) dt \right),$$

где $b_1, b_2, m_H, R_0, K_{pH}, H_{MFN}$ - постоянные.

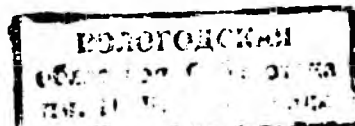
Итак, все потоки в модели заданы. Выпишем дифференциальные уравнения, описывающие данную модель:

$$\dot{N}_1 = \alpha(t) (F - P) - (m_1 (z_1) + m_2 (R_H)) N_1,$$

$$\dot{N}_2 = (1 - \alpha(t)) (F - P) - m_2 N_2;$$

$$\dot{N}_{21} = [(1 - \alpha(t)) (F - P) N_{21} / N_2 - m_{21} (pH)] / (1 + P), \quad 16/$$

1106452



$$N_3 = (m_1 + m_2) N_1 + m_2 N_2 - (m_3 (\rho H) + m_4 (\rho H) + m_5 (N_2)) N_3$$

$$\dot{N}_4 = R_N + N_{FIX} + m_5 (\rho H) N_3 - F - m_4 N_4,$$

$$\dot{S}_1 = \begin{cases} K_2 (S_{02} - S_1) N_1 / 2 S_1 - \pi_{SF} - (m_1 + m_2) S_1, & S_1 > S_0 \\ 0, & S_1 \leq S_0 \end{cases}$$

В математическом отношении решается задача Коши для системы обыкновенных, нелинейных, неавтономных дифференциальных уравнений.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Модель была реализована на ЭВМ ЕС-1061 на языке PL /I. Решение системы /6/ осуществлялось методом Эйлера с постоянным шагом.

В описанной модели есть свыше пятидесяти постоянных параметров. При машинной имитации численные значения этих параметров брались либо из литературных данных, либо задавались в пределах некоторого "правдоподобного" диапазона и уточнялись в процессе калибровки модели.

Сначала осуществлялась идентификация модели при нормальных условиях, т.е. в отсутствие загрязнений. Использовались данные из работы Н.И.Казимирова "Круговорот веществ и энергии в ельниках Карелии" [II]. В работе приведены данные о круговороте азота и серы в ельниках-черничниках в возрасте от 22 до 138 лет, в частности, данные о содержании азота и серы в различных частях деревьев, о потреблении азота на фотосинтез и его распределение в растении, скорости опада хвои и древесины. Поэтому данные, касающиеся нормального роста древостоя, либо непосредственно брали из этой работы, либо получали при аппроксимации приводимых в ней данных о динамике азота хвои и древесины гипотетическими кривыми, выбранными в модели. В результате этого было воспроизведено развитие экосистемы

ельника в возрасте от 22 до 140 лет. Точность 10%.

Данные, касающиеся выпадения кислотных дождей и их влияния на растительность, брались из работы [1]. Для идентификации параметров, связанных с поглощением SO_2 и его воздействием на растения, мы пользовались данными из нескольких источников: [1, 6, 12, 13, 14].

Наиболее полная информация о поглощении SO_2 представлена в работе [3]. В ней приводятся данные о пороговых величинах накопления избыточной серы в хвое, о взаимосвязи концентрации SO_2 с его накоплением в растении и о пороговых значениях концентрации SO_2 в атмосфере. В соответствии с этими данными и проводился выбор параметров уравнения для S^1 .

Данные, касающиеся воздействия растений на кислотность почвы, приводятся в работе [9]. Характерное время разложения МОВ принималось равным 100 лет [15], откуда параметр $m_3^e = 0,001 \text{ год}^{-1}$. Остальные коэффициенты брались из "правдоподобного" диапазона значений.

Численные значения коэффициентов приводятся в таблице.

ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Параметр	Значение	Единица измерения	Источник
a	$4,43 \cdot 10^{-6}$	Безразмерная	II
a_3	0,1	" "	II
a	0,7	" "	I3
A	0,8	" "	IO
a_4	0,077	$\frac{\text{кг м}^{-2} \text{сут.}^{-1}}{\text{Вт см}^{-2}}$	IO
b	$9 \cdot 10^{-4}$	безразм.	II

Параметр	Значение	Единица измерения	Источник
v_1	$4,76 \cdot 10^{10}$	Безразмерная	I
v_2	$9,52 \cdot 10^{10}$	"	I
c	0,058	"	II
c_a	$5 \cdot 10^{-4}$	кг/м ³	2
d	0,49	Безразмерная	II
E	7,5	"	II
F_0	$2,6 \cdot 10^{-5}$	кг/м ² сут	10
F_{max}	1,5	Безразмерная	16
H_{min}	$10^{-pH_{min}}$	"	9
I_{ψ}	0,003	Вт см ⁻²	10
K_{IN}	0,58	сут. ^{-I}	I
K_{IS}	0,58	"	I
K_{2N}	1,29	"	I
K_{2S}	0,97	"	I
K_D	$1,2 \cdot 10^{-4}$	"	10
KP	96,1	Безразмерная	3
K_{PH}	$9,43 \cdot 10^{-3}$	кг сут ^{-I}	I
K_S	$9 \cdot 10^3$	Безразмерная	3
m_1°	$1,2 \cdot 10^{-3}$	сут ^{-I}	II
m_2°	$3,9 \cdot 10^{-5}$	"	II
m_3°	$7,54 \cdot 10^{-5}$	"	16
m_4	$8,51 \cdot 10^{-3}$	"	3
m_a°	$1,95 \cdot 10^{-3}$	"	8
m_b°	$3,4 \cdot 10^{-3}$	Безразмерная	12
m_N	$8,52 \cdot 10^{-3}$	"	3
m_s°	0,0122	"	12
N_{IN}	$4,68 \cdot 10^{-3}$	кг/м ²	3
N_{2MIN}	$8,53 \cdot 10^{-4}$	"	12

Параметр	Значение	Единица измерения	Источник
n_g	1,7	Безразмерная	3
n_m	1,7	"-	3
PH_a	5	"-	9
PH_{MIN}	3	"-	9
z	$1,5 \cdot 10^{-3}$	сут/м	10
R_0	$2 \cdot 10^{-8}$	кг/м ² сут	1
R_{HMIN}	20	"-	3
τ_{SA}	3,9	Безразмерная	10
S^{SO_2}	$1 \cdot 10^{-7}$	кг/м ³	8
Y	1,5	Безразмерная	11
β	0,3	"-	16
β_N	0,014	"-	1,
β_S	0,05	"-	1
ξ_{Fg}	0,4	кг/м ³	3
ξ_{mg}	0,4	"-	3
ψ_g	0,8	Безразмерная	10
α	$1 \cdot 10^{-7}$	"-	1

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

(Динамика экосистемы в отсутствие антропогенных воздействий)

На рис. 5 представлены результаты идентификации модели. Естественная динамика хвойной экосистемы, данные о которой приведены в [11], была реализована в модели заданием незначительных, "фоновых" потоков азота и серы из атмосферы, что соответствует отсутствию антропогенных воздействий и в дальнейшем называется "нормой воздействий". Из графика видно, что азот хвои N_I первоначально возрастает, в возрасте 55-65

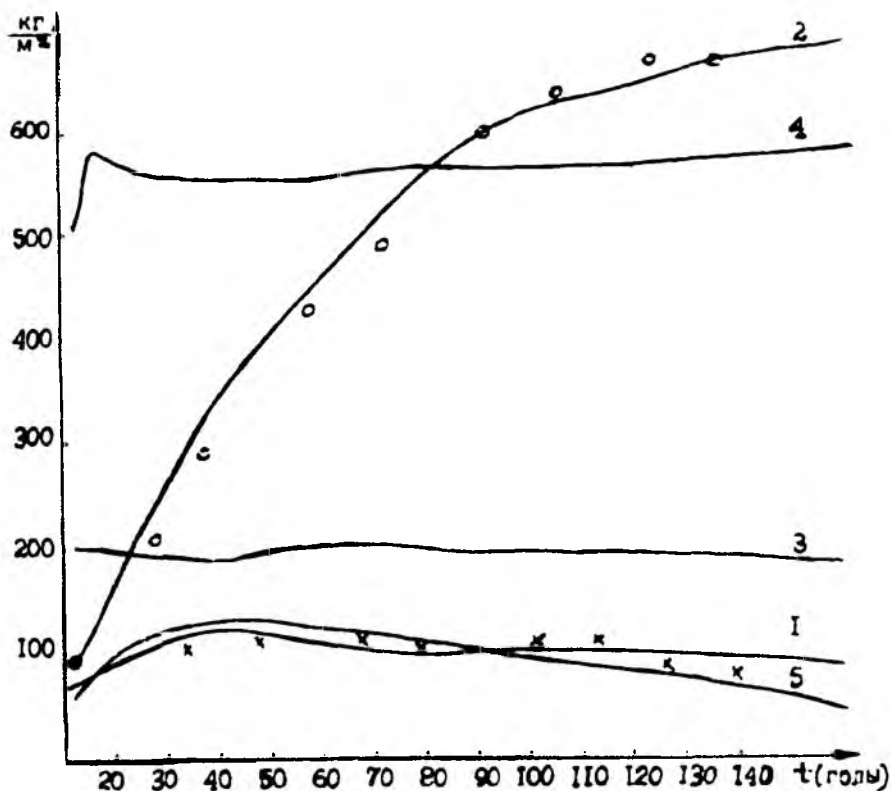


Рис. 5.

Динамика экосистемы в отсутствие внешних воздействий. Цифрами на графике обозначены: 1- N_1 , 2- N_2 , 3- $N_3 \times 10^{-1}$, 4- $N_4 \times 10$, 5 - N_{21} . Значками обозначены эмпирические данные для: X - азота хвои, O - азота древесины.

лет достигает максимума, а затем убывает. Однако можно заметить некоторую немонотонность этого убывания как переменной N_1 модели, так и последовательности эмпирических точек для биомассы азота хвои. В возрасте 85-110 лет наблюдается некоторое возрастание переменной N_1 , что, по мнению авторов работы, обусловлено возрастанием в этом возрасте доли асси-

миллионов, идущих в хвою, заданной аппроксимированной по экспериментальным данным функцией. Азот древесины N_2 возрастает, но скорость его роста монотонно убывает. Азот тонких корней N_{21} меняется подобно азоту хвои. Отличие состоит в том, что после достижения максимума он убывает несколько быстрее. Содержание азота МОВ N_3 сначала незначительно убывает, затем достигает прежнего уровня и остается стабильным. Содержание усвояемого азота N_4 резко возрастает в период, когда молодые деревья потребляют его на рост еще незначительно; к сорока годам N_4 несколько снижается и до 120 остается постоянным ввиду интенсивного потребления его растениями; после чего наблюдается его постепенное увеличение, связанное с уменьшением фотосинтеза у старых деревьев.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭКОСИСТЕМУ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДВУОКИСИ СЕРЫ В ТЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Моделировалось воздействие на 22–45-летние древостои атмосферного SO_2 по концентрации в 10–20 раз превосходящего норму. Результаты моделирования для 22-летних древостоев представлены на рис. 5.

Из приводимых графиков видно, что увеличение концентрации SO_2 приводит к уменьшению значений переменных N_1 , N_2 , N_{21} , N_3 и к увеличению содержания неорганической серы в хвое S' и переменной N_4 /усваиваемый азот/. Последнее легко объясняется уменьшением потребления усвояемого азота на построение органического вещества.

При воздействии девятнадцатикратной /относительно нормы/ концентрации SO_2 через 23–35 лет после начала воздействия наблюдается полный опад листьев, вслед за этим происходит

быстрое отмирание древесины и значительное уменьшение содержания азота МОВ. Содержание усваиваемого азота возрастает, так как фотосинтез равен нулю, а начиная с возраста 50-70 лет медленно убывает за счет вымывания. Накопившаяся в начале воздействия неорганическая сера в хвое обращается в нуль вместе с азотом хвои.

При сравнении результатов воздействия одних и тех же концентраций $S O_2$ на 22-летние и 45-летние древостои было сделано заключение о том, что при равной продолжительности воздействия больший ущерб наносится 45-летним древостоям. Это объясняется увеличением дыхания древостоя с ростом биомассы древесины и корней.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДВУОКСИ СЕРЫ НА ЭКОСИСТЕМУ

Моделировалось кратковременное воздействие на двадцатидвухлетние древостои $S O_2$ с концентрацией, превосходящей норму в 15-25 раз. Время воздействия выбиралось так, чтобы в итоге не получить гибели древостоя. Таким образом, мы получили возможность имитировать восстановление древостоя после прекращения воздействия. Результаты моделирования приведены на рис. 6. Следует отметить, что под восстановлением древостоя здесь понимается не восстановление леса, моделирование которого требует введения ряда неучтенных в модели факторов и выходит за пределы задач данной работы /как уже было сказано, мы рассматриваем одновидовой, одновозрастный древостой/. Из рис. 6 видно, что полного восстановления биомассы древесины и хвои не происходит даже при относительно невысоких концентрациях $S O_2$, долговременное воздействие которых не ведет к

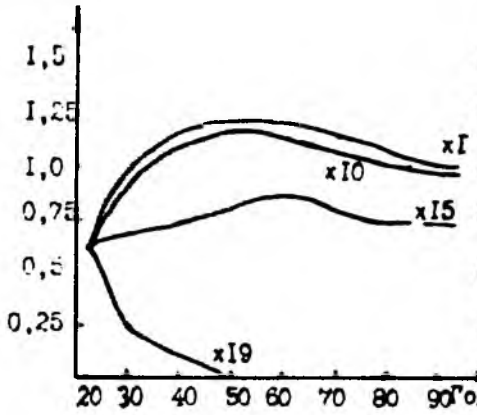
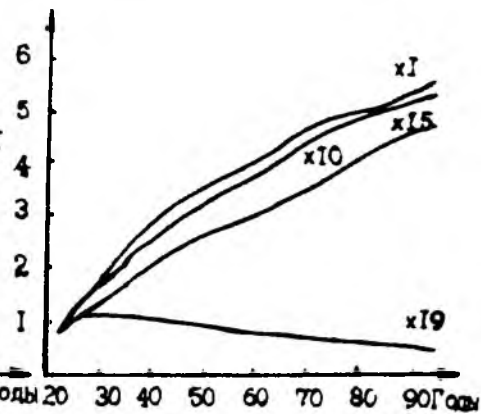
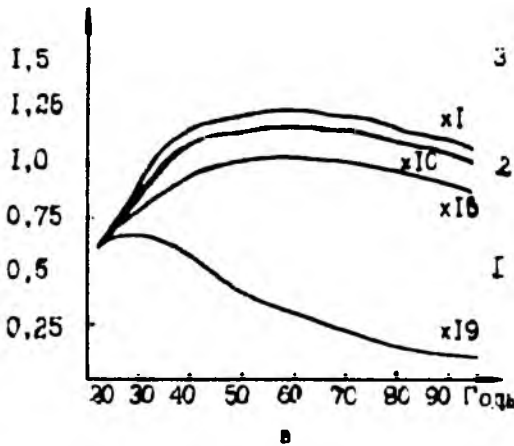
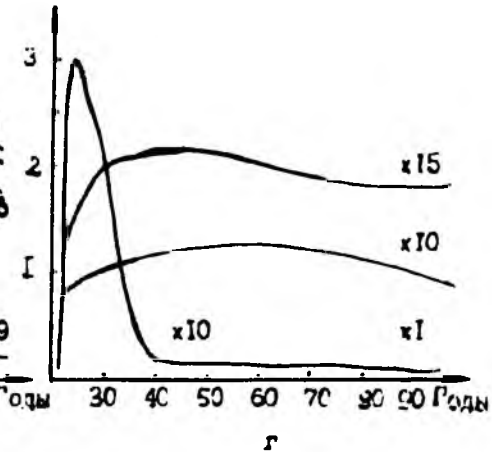
$N_1 \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$  $N_2 \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$  $N_{21} \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$  $S_1 \times 10^4 (\text{кг}/\text{м}^2)$ 

Рис. 6.

Постоянное воздействие SO_2 на 22-летний древостой (указаны степени усиления воздействия по отношению к норме): а - азот хвои, б - азот древесины, в - азот тонких корней, г - сера хвои (неорганическая).

гибели древостоя. При очень высоких концентрациях двуокиси серы в атмосфере устьичный аппарат хвои выходит из строя, что ведет к быстрому полному закрыванию устьиц и, следовательно, прекращению фотосинтеза. Наблюдается быстрый, почти полный опад хвои. Кроме того, высокое устьичное сопротивление препятствует поступлению неорганической серы в хвою, (рис. 7г) (кривая 4). Цифрами на графике обозначены: 1 - динамика системы в отсутствие воздействия; 2- 15 - кратная концентрация SO_2 от 22 до 45 лет; 3- 19 - кратная концентрация SO_2 от 22 до 35 лет; 4 - 25 - кратная концентрация SO_2 от 22 до 32 лет.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭКОСИСТЕМУ КИСЛОТНЫХ ДОЖДЕЙ

Моделировалось долговременное воздействие кислотных дождей на экосистему. В модели это задавалось как увеличение притока ионов водорода в почву из атмосферы R_H в 4-12 раз, начиная с 22-летнего возраста древостоя. Результаты имитационных экспериментов приведены на рис. 8. Из графика видно, что при относительно небольшом увеличении R_H /четырекратное увеличение/ рост древостоя сначала увеличивается по сравнению с ростом в отсутствие воздействия, а затем уменьшается.

Увеличение роста связано с дополнительным притоком в почву усваиваемого азота с ионами водорода, т.е. с увеличением N_4 , а последующее уменьшение - с уменьшением в результате закисления почвы азота тонких корней, что в свою очередь увеличивает устьичное сопротивление, а, значит, и фотосинтез. При более значительном увеличении потока R_H увеличения роста не происходит. Уменьшение фотосинтеза в результате увеличения устьичного сопротивления листа можно интерпретировать также как и уменьшение транспирации, и, следовательно, как недостаток влаги в растении.

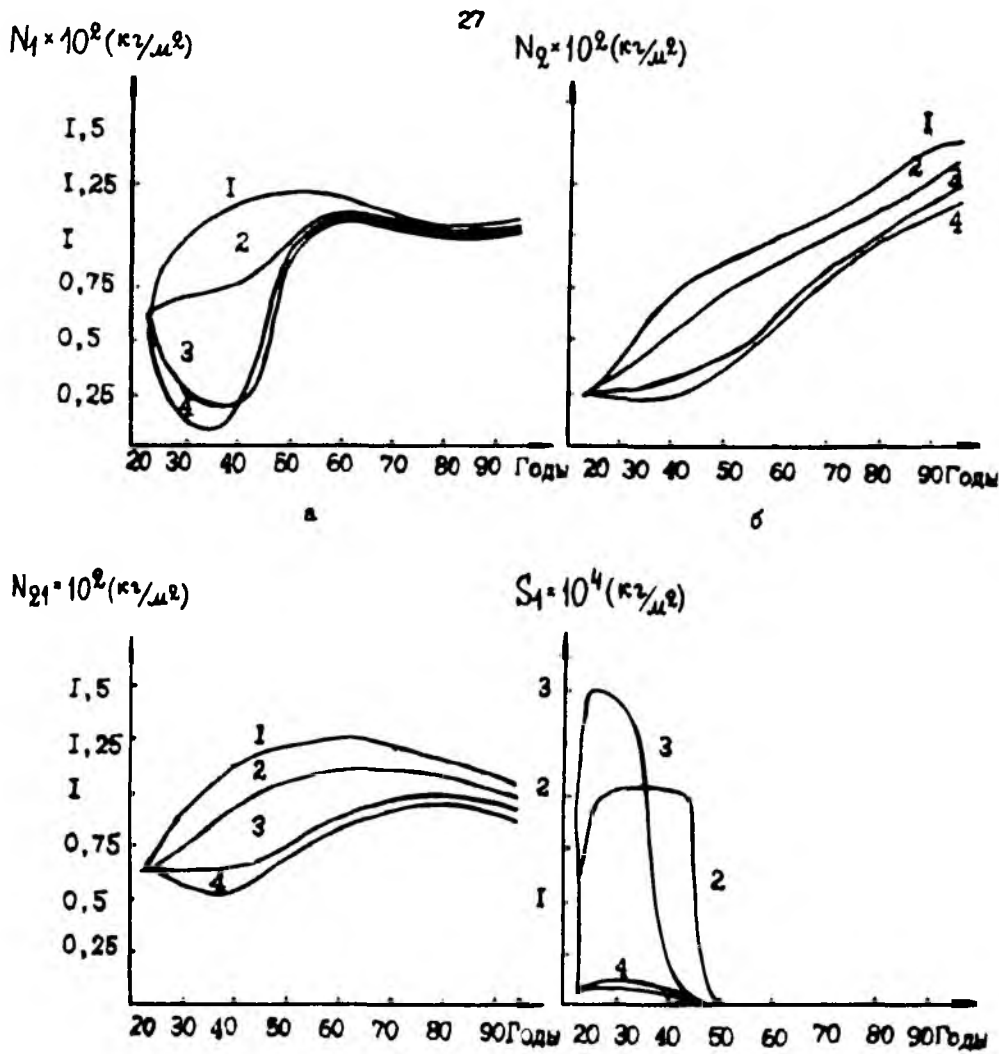
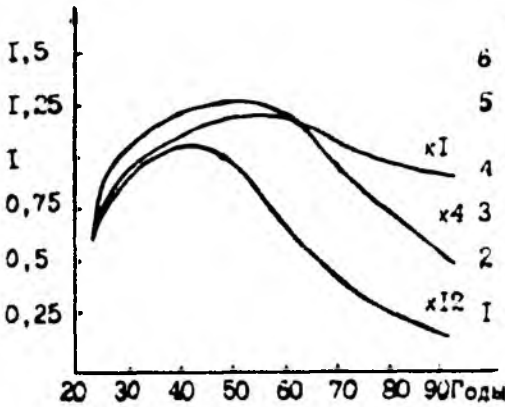
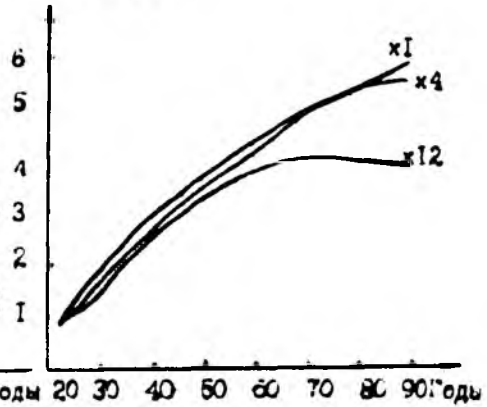


Рис. 7.

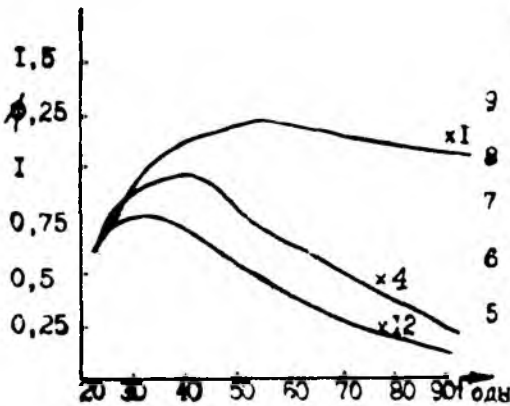
Кратковременное воздействие SO_2 на экосистему:
 а - азот хвои, б - азот древесины, в - азот тонких корней, г - сера хвои (неорганическая).

$N_1 \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$ 

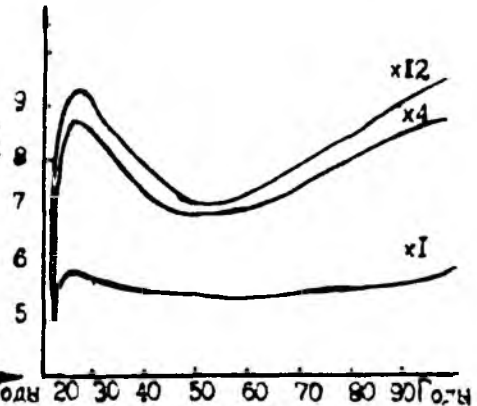
а

 $N_2 \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$ 

б

 $N_{21} \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$ 

в

 $N_4 \times 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$ 

г

Рис. 8 .

Долговременное воздействие кислотных дождей на экосистему:
 а - азот хвои, б - азот древесины, в - азот тонких корней,
 г - усваиваемый азот.

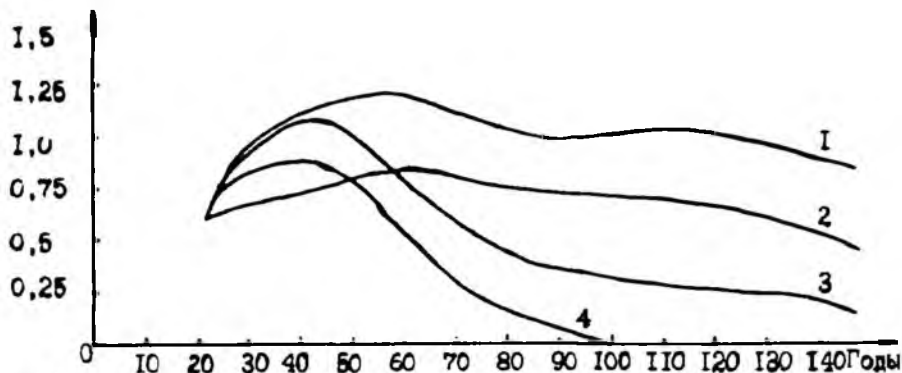
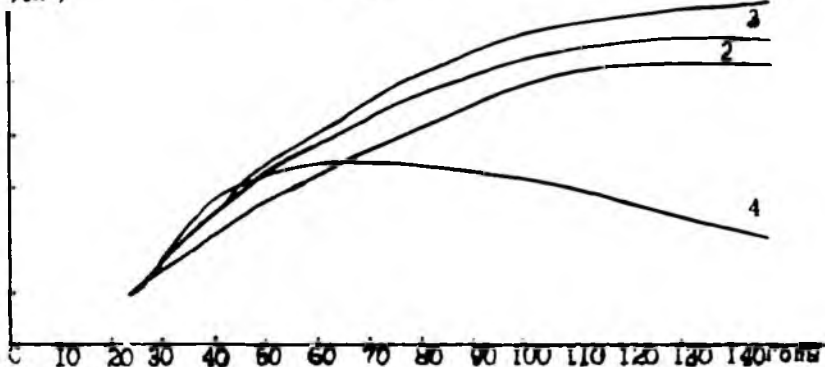
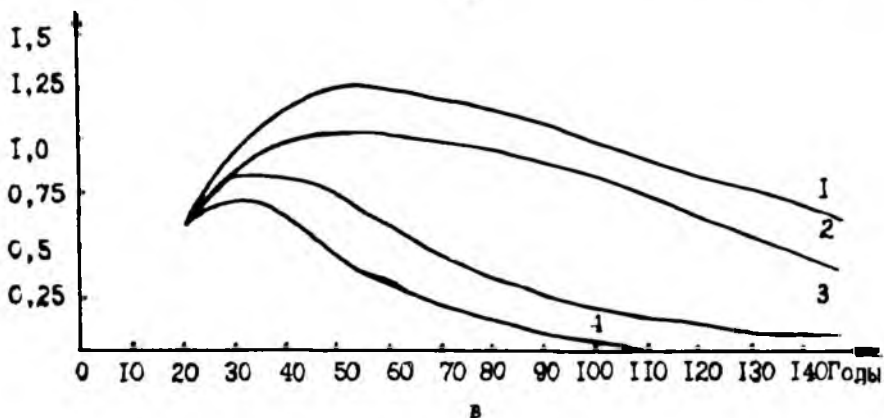
$N_1 \cdot 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$

 $N_2 \cdot 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$

 $N_{21} \cdot 10^2 (\text{кг}/\text{м}^2)$


Рис. 9.

Совместное воздействие кислотных дождей и SO_2 :

а - азот хвои, б - азот древесины, в - азот тонких корней.

АНАЛИЗ СОВМЕЩНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КИСЛОТНЫХ ДОЖДЕЙ И ДВУОКИСИ СЕРЫ

Было проведено три следующих эксперимента с моделью:

- а/ Воздействие на экосистему пятнадцатикратно превосходящей норму концентрацией двуокиси серы, начиная с 22-летнего возраста древостоя;
- б/ Воздействие на экосистему кислотным дождем в 10 раз превосходящим норму, начиная с 22-летнего возраста древостоя;
- в/ Совместное воздействие обоих факторов.

Результаты экспериментов приведены на рис. 9. Из графиков видно, что степень повреждения нелинейно зависит от сочетания факторов. Каждое из двух первых воздействий приводит к замедлению роста древостоя, а их совмещение губит ельник. Цифрами на графике обозначены: 1 - отсутствие воздействий; 2-15 - кратное увеличение концентрации SO_2 ; 3-10 - кратное увеличение потока R_n ; 4 - совместное действие обоих факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базилевич Н.И., Гребенчиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. - М.: Наука, 1986. - 296 с.
2. Бихеле З.В., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Моделирование продукционного процесса растений в условиях недостатка почвенной влаги. -Л.: Гидрометеиздат, 1984.
3. Ведюшкин М.А., Тарко А.М. Моделирование воздействия промышленных загрязнений на лесные биогеоценозы. /Математи-

- ческое моделирование в биогеоценологии. Ред. Н.И.Казимиров, Петрозаводск, 1985.
4. Воротынцев А.В., Осупов М.В., Модель водно-теплого режима агроценоза // Кибернетика и вычислительная техника. - М. : Наука, 1987., вып.3. - С.32-47.
 5. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979.
 6. Иванов А.Ф. Рост древесных растений и кислотность почв. - Минск, 1970.
 7. Кислотные дожди /Ю.А.Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Пресман и др. - Л.: Гидрометеоиздат, 1984,-206 с.
 8. Казимиров Н.И., Морозова Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. - Л.: Наука, 1973.
 9. Карпенко А.Д. Влияние промышленных выбросов на еловые фитоценозы северной тайги Кольского полуострова. - Тарту, 1984.
 10. Крапивин В.Ф., Свирев Ю.М., Тарко А.М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. - М.: Наука, 1982.
 11. Круговорот веществ в природе и его изменение хозяйственной деятельностью человека. Ред. А.М.Рябчиков. - М.: МГУ, 1980.
 12. Кулагин Ю.З. Древесные растения и промышленная среда. - Уфа, 1969.
 13. Лархер В. Экология растений. - М.: Мир, 1978.
 14. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. - М.: Наука, 1985.
 15. Рачко П. Имитационная модель роста дерева как элемента лесного биогеоценоза // Вопросы кибернетики, вып.52, 1979.

16. Рудкова А.А. Пути воздействия загрязнения атмосферы соединениями серы на наземные растения. /Проблемы экологического мониторинга моделирования экосистем. 1981.-Т.IV.- С.68-75.
17. Тарабрин В.П. Фитотоксичность органических и неорганических соединений. Ред.Е.Н.Кондратюк.-Киев.: Наукова думка, 1986.
18. Тарко А.М., Ведюшин М.А., Писаренко Н.Ф., Татаринев Ф.А. Моделирование воздействия промышленных загрязнений на лесные экосистемы.-М.: Вычислительный центр АН СССР, 1987.-19с.