

Компьютеризация экологических исследований

С.В. Мамихин

Факультет почвоведения, Московский государственный университет,
Воробьевы горы, 119899 Москва, Россия

В статье представлены результаты компьютеризации исследований круговорота углерода и поведения радионуклидов в наземных экосистемах, проводившихся в лаборатории радиоэкологии МГУ. Целенаправленное применение математического моделирования и информационных технологий позволило всесторонне проанализировать данные полевых работ, провести численные эксперименты и дать прогноз развития ряда неблагоприятных экологических ситуаций.

В современных условиях в связи с повышением ответственности экологов за решения, принимаемые в отношении объектов живой природы, повышаются также требования к методологии проведения экологических исследований. Развитие и широкое применение новых, высокоэффективных методов при проведении природоохранных исследований - актуальная задача современной науки об охране окружающей среды. В настоящее время одно из наиболее динамично развивающихся направлений в науке - это компьютеризация исследований, которую можно охарактеризовать как методологию, основанную на применении ЭВМ и информационных технологий для накопления, обработки, формализации и анализа информации и определяющую стратегию проведения исследований и их результативность. Использование этой методологии в исследованиях в лаборатории радиоэкологии МГУ способствовало значительному прогрессу в исследованиях биологического круговорота углерода и экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС [1].

Ведущим процессом при использовании компьютеризации является интеграция информации. Этапы интеграции информации в рамках компьютеризации экологических исследований в основном соответствуют традиционному порядку их

проведения: сбор данных, их обработка и анализ. По степени интегрированности информации можно выстроить следующий условный ряд: базы данных - математические модели - информационно-прогностические системы.

Исследования, которые проводились коллективом лаборатории радиоэкологии факультета почвоведения МГУ в 1986 - 1995 гг. в 30-км зоне аварии ЧАЭС на Украине и на загрязненных территориях в России, позволили получить большое количество информации по динамике содержания радионуклидов в компонентах лесных экосистем и продукции лесного хозяйства, а также по свойствам почвы (физико-химические характеристики, запасы подстилки и гумуса и т.д.) и уровням гамма-излучения на опытном полигоне. Для решения проблем унификации данных, их обработки и анализа, обеспечения быстрого доступа к исходным данным и результатам их обработки был создан банк данных. Для обработки данных был разработан специализированный пакет программ, которые работают с пользователем в режиме диалога, запрашивая необходимую информацию, осуществляют поиск данных по указанным критериям, их статистическую обработку, расчет коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растения, процентного содержания радионуклидов в компонентах растительного покрова и т.д. В рамках исследований биологического круговорота углерода для сбора и обработки необходимой информации были созданы базы данных по продукционным и почвенным характеристикам наземных экосистем. Базы данных были использованы на втором этапе интеграции информации при построении математических моделей.

Изучение динамики углерода органического вещества в растительном и почвенном покрове При разработке имитационных моделей динамики органического вещества учитывалось, что углерод атмосферы, включаясь в процессе фотосинтеза в состав органического вещества, подвергается затем процессам трансформации, с разной скоростью возвращается в атмосферу, депонируясь в долгоживущих тканях живых организмов и гумусе почвы. Наряду со спецификой рассматриваемых проблем, это обуславливает разный временной масштаб моделей, которые можно грубо подразделить на модели многолетней (шаг не менее 1 года) и сезонной динамики (внутригодовой) динамики (шаг менее года). Модели точечные (пространственное строение объекта не рассматривается). Модели много-

летней динамики детерминированные (значения переменных определяются однозначно). В моделях сезонной динамики присутствуют элементы стохастичности для отражения влияния глобальных метеорологических явлений.

Модели многолетней динамики углерода органического вещества в компонентах лиственного леса, целинной степи и агроценоза Модели разрабатывались для уточнения характеристик биологического круговорота углерода, в том числе и при хозяйственном использовании экосистем, а также для использования в качестве базовых блоков при прогнозировании динамики радионуклидов. В аналитической форме модели описываются системами дифференциальных уравнений первого порядка, составленных на основе балансовых соотношений. Параметры моделей идентифицировались по литературным данным и с помощью самих моделей методом итераций. Проверка моделей осуществлялась с привлечением данных о возрасте почв, а также по данным о потерях гумуса мощного чернозема при многолетнем использовании почвы под сельскохозяйственные культуры и под паром.

Модели позволили уточнить характеристики биологического круговорота углерода в климаксных экосистемах лиственного леса и луговой степи [2-3]. Для агроценоза на мощном типичном черноземе были определены коэффициенты гумификации и минерализации гумуса в различных горизонтах почвы под посевами озимой пшеницы и коэффициентов минерализации гумуса в режиме парования [4].

Модели сезонной динамики углерода органического вещества в растительном и почвенном покрове экосистем Рассмотрение многих процессов функционирования экосистем (фотосинтез, дыхание, смена фенологических стадий и т.д.) с целью изучения влияния внешних по отношению к экосистеме факторов должно проводиться в соответствующем временном масштабе. В связи с этим были разработаны имитационные модели сезонной (внутри-годовой) динамики углерода органического вещества в пустынной экосистеме (илаковый белосаксаульник на пустынной песчаной почве) [5] и лесной экосистеме умеренных широт (снытевая дубрава на темно-серой лесной почве) [6] с шагом в 1 час. Отметим ряд наиболее важных на наш взгляд аспектов данных моделей.

Существуют различные способы отражения влияния факторов окружающей среды на функционирование экосистем в моделях. Проведенные нами эксперименты с моделями позволили выбрать для каждого объекта моделирования такой подход в реализации учета влияния факторов окружающей среды, который бы наиболее соответствовал данному типу экосистем. В пустынной экосистеме, характеризующейся резкими внутрисуточными колебаниями температуры и практически постоянным дефицитом влажности почвы, адекватным оказался алгоритм, реализованный согласно “закону минимума” Либиха. Значения вспомогательной функции отклика f_0 , входящей в функцию переноса рассчитывалось по значению того фактора, который был меньше по отношению к оптимуму, значения других факторов игнорировались: $f_0 = \min(f_1, \dots, f_n)$, где f_1, \dots, f_n - частные функции отклика системы на изменения n факторов. Для широколиственного леса умеренной полосы более адекватным оказался подход, основанный на учете сочетанного воздействия факторов на рассматриваемый процесс в следующей форме: $f_0 = a * (f_1 * f_2 * \dots * f_{n-1} * f_n)$, где a - компенсирующий коэффициент.

В модели пустынной экосистемы реализован подход, основанный на раздельном рассмотрении структурной биомассы и ассимилятов. В модели широколиственного леса общий пул ассимилятов введен как фиктивный резервуар, который всегда пуст (сумма потоков, поступающих в пул, равна сумме потоков, выходящих из него). Ключевым вопросом является принцип распределения ассимилятов, который использован в модели. Нами предложен подход, который можно назвать принципом “возмущенного генетического стандарта”. Исходя из предположения о генетически закрепленном механизме распределения ассимилятов и дестабилизирующем влиянии внешних факторов на него, в моделях используются матрицы фенологических коэффициентов распределения с введением “фенологического времени”, учитывающего различие между текущими метеопказателями и соответствующими среднесезонными данными. Эти коэффициенты используются в функциях переноса и определяют интенсивность потоков перераспределения ассимилятов в соответствии с сезонной ритмикой жизненного цикла растений. Дополнительное перераспределение ассимилятов осуществляется согласно близости условий функционирования соответствующих компонентов к оптималь-

ным. Проверка моделей осуществлялась многосторонне по данным многих исследователей, занимавшихся тем или иным аспектом состава, структуры и функционирования экосистем.

Для снытевой дубравы была рассчитана сезонная динамика запасов, продукции, дыхания, опада компонентов фитомассы и запаса подстилки по среднеголетним и реальным данным, уточнен вклад корневого опада в гумусообразование, получена оценка устойчивости дубрав к колебаниям среднегодовой температуры (рис. 1) и влажности почвы.

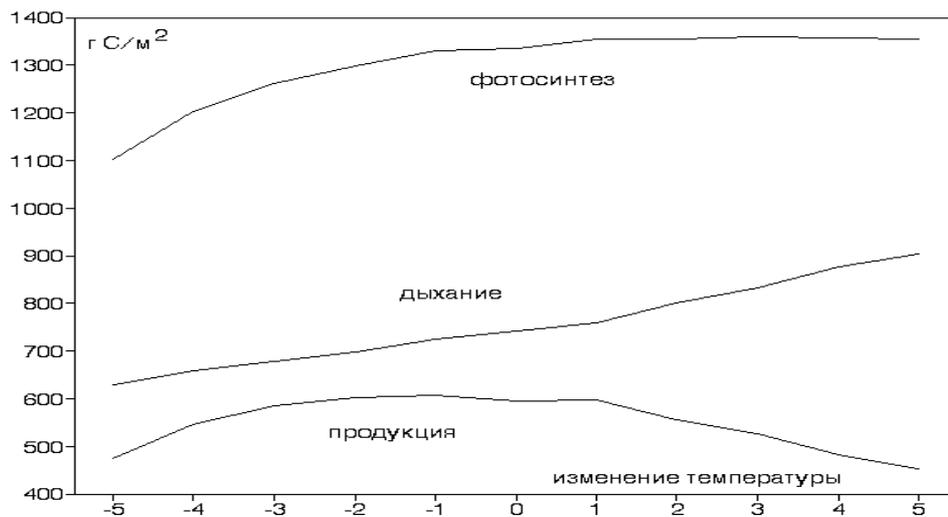


Рис. 1 Прогноз зависимости величины суммированных за год наблюдаемого фотосинтеза, дыхания и продукции в снытевой дубраве от изменений среднегодовой температуры относительно среднеголетней величины.

Модель пустынной экосистемы (илаковый белосаксаульник) также воспроизводит сезонную динамику фотосинтетической активности, дыхания и продукции, запасов и опада компонентов фитомассы. Для оценки влияния выпаса овец на запасы фитомассы и продуктивность в модели рассчитывается выедание фитомассы и количество выделяемых экскрементов. Результаты экспериментов с моделью показали, что зависимость продуктивности белосаксаульника от среднегодовой температуры характеризуется ясно выраженным максимумом при среднегодовой температуре воздуха 16.5°C . Это, а также расчеты по метеоданным засушливых лет, количественно подтверждает тезис о большой чувствительности пустынных экосистем к различного рода воздействиям. Выпас овец, даже не превышающих

численностью принятой нормы (1 овца на 6 га), приводит к нарушению существующей структуры экосистемы: понижению запаса фитомассы илака и нарастанию фитомассы саксаула, что объясняется спецификой кормового рациона овец, и недопустимо в условиях заповедного режима.

Поведение радионуклидов в растительном и почвенном покрове

Параллельно с изучением биологического круговорота углерода решалась сопряженная проблема загрязнения компонентов биосферы его радиоактивным изотопом ^{14}C техногенного происхождения, оказывающим отрицательное воздействие на стабильность генофонда живых организмов. Для воспроизведения динамики накопления радиоуглерода были использованы модели многолетней динамики стабильного углерода органического вещества в компонентах лиственного леса, целинной степи и агроценоза. С помощью моделей дан прогноз интенсивности накопления радиоуглерода в компонентах этих экосистем в ситуации образования в приземном слое атмосферы постоянной концентрации ^{14}C равной 1 Бк/г ^{12}C [2-4, 7].

Чернобыльская авария явилась крупнейшим радиационным инцидентом. Радиоактивное загрязнение обширных лесных массивов потребовало разработки соответствующих моделей для прогнозирования дальнейшего поведения радионуклидов. В радиобиологическом аспекте наиболее опасным загрязнителем, поступившим в биосферу при аварии на ЧАЭС, следует считать долгоживущий радиоактивный изотоп цезия - ^{137}Cs . В рамках программ по изучению и ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, нами был разработан комплекс моделей динамики содержания ^{137}Cs в почвенном покрове и растительности лесных экосистем.

Вертикальная миграция ^{137}Cs в почвах Одной из наиболее острых проблем, возникших в результате Чернобыльской аварии, стала возможность проникновения радионуклидов в источники питьевой воды. Для решения этой проблемы в числе прочих задач требовалось дать оценку скорости вертикальной миграции радионуклидов в почве. Нами были построены математические модели миграции ^{137}Cs в автоморфной почве элювиального ландшафта (дубрава) и гидроморфной почве аккумулятивного ландшафта (черноольшанник). С шагом в 1 день воспроизводилась ситуация мелкодисперсных радиоактивных выпадений. При отработке раз-

личных вариантов моделей была обнаружена важная роль транзитного переноса радионуклидов по профилю при участии корневых систем и гифов грибов. Был дан прогноз динамики вертикального распределения ^{137}Cs в почве и проведены численные эксперименты по изучению влияния на скорость его миграции гидроморфности почв, наличия и скорости разложения лесной подстилки, толщины гумусированного горизонта [1, 8].

Многолетняя динамика содержания ^{137}Cs в компонентах лесных экосистем Поскольку леса являются объектами активного хозяйственного использования, после аварии на ЧАЭС появилась острая потребность в прогнозе развития ситуации на залесенных территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. С этой целью был разработан банк моделей поведения ^{137}Cs в дубраве и сосняке различной гидроморфности. Используемый алгоритм, характеризуется следующим: (1) Содержание радионуклидов в растительности подразделяется на две части (наружное и внутреннее загрязнение), динамика которых рассматривается отдельно. Критерием такого разделения является путь поступления радионуклида в структурную часть растения. (2) Предполагается, что поведение ^{137}Cs подчиняется тем же закономерностям, что и поведение его стабильного химического аналога - калия. (3) Динамика радионуклида рассматривается в связи с динамикой фитомассы. Проверка работы моделей проводилась по данным о динамике ^{137}Cs в лесах 30-км зоны аварии ЧАЭС и по данным о распределении по компонентам древостоя глобального ^{137}Cs различных авторов.

Модели позволяют достаточно реалистично воспроизводить ситуацию загрязнения радиоцезием лесной экосистемы в результате одномоментного выброса (однократного или в течении ряда лет) радиоактивных веществ в атмосферу в мелкодисперсной форме (размер частиц не более 10 мкм). На рисунке 2 представлен прогноз динамики содержания ^{137}Cs в фитомассе элювиального ландшафта на 20 лет в гипотетической ситуации повторения аналогичного выпадения через 10 лет после Чернобыльской аварии.

Результаты работы моделей подтвердили предположение о важности роли корневых систем в перераспределении радионуклидов в экосистемах, сделанное ранее при построении модели вертикальной миграции ^{137}Cs в почвах. Согласно

расчетам максимальная интенсивность поступления ^{137}Cs (% от первоначальной плотности загрязнения в год) через корневую систему составила для элювиального ландшафта - 0.145, для аккумулятивного - 13.2, максимальная интенсивность выноса составила соответственно 0.143 и 1.03%. Таким образом, можно констатировать, что весьма важным фактором в распределении радионуклидов в экосистеме в целом и в почвенном профиле в частности является участие корневых систем растения. Причем, помимо общеизвестной роли корневой системы в поглощении радионуклидов из почвы, не менее важную роль играет поступление ^{137}Cs из дровостоя в почву в результате прижизненных выделений и отмирания корней. Это обеспечивает, как уже указывалось, транзитное поступление радионуклидов в менее загрязненные слои почвы.

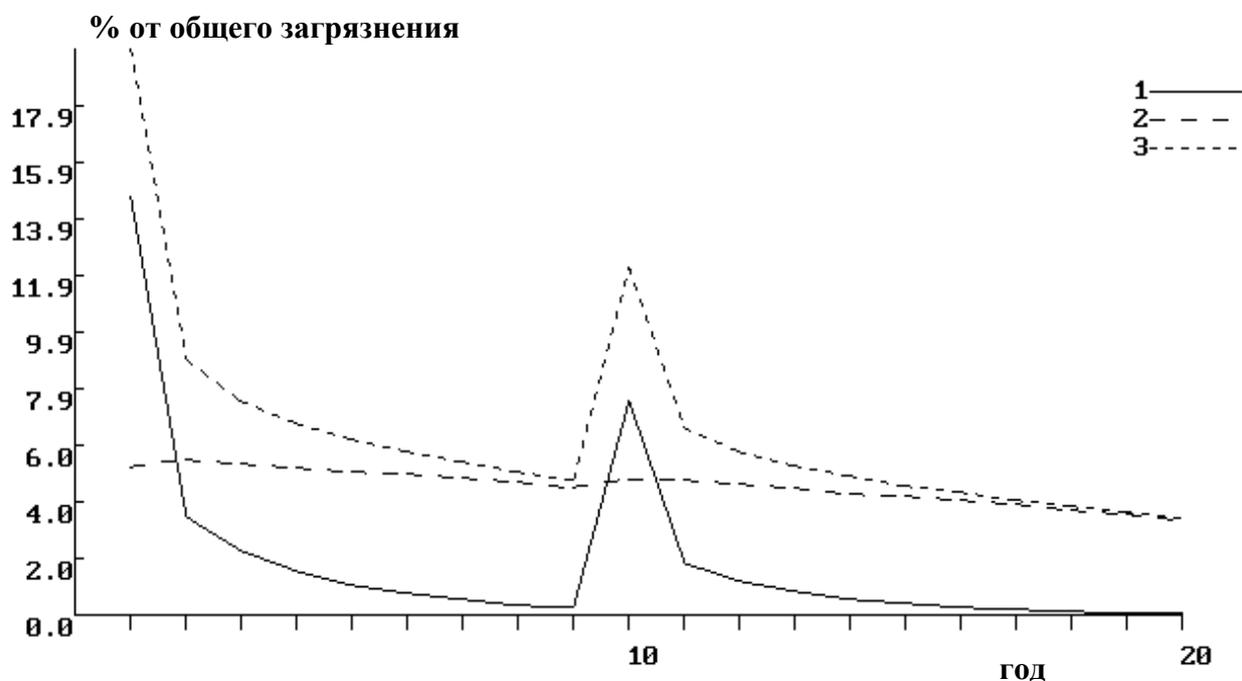


Рис. 2 Прогноз 20-летней динамики содержания ^{137}Cs (% от общего загрязнения) в растительном покрове элювиального ландшафта для ситуации двукратного выпадения радиоактивных осадков (загрязнение: 1 - наружное, 2 - внутреннее, 3 - суммарное).

Информационно-прогностическая система “ЭКОРАД” Создание информационно-прогностических систем является этапом компьютеризации исследований, на котором достигается максимальное обобщение накопленной информации. В рамках информационного обеспечения исследований последствий аварии на ЧАЭС

нами была разработана радиоэкологическая информационно-прогностическая система ЭКОРАД, интегрирующая информационные текстовые и графические материалы, базы радиоэкологических данных и банк моделей поведения радионуклидов в растительности и почве наземных экосистем. В последней версии ЭКОРАД реализованы следующие возможности: оперативное получение информации о методологии радиоэкологического мониторинга; получение информации о поведении в растительности и почве наиболее опасных в радиологическом аспекте радионуклидов; прогноз распределения радиоцезия ^{137}Cs по компонентам лиственного и хвойного лесов с различными режимами увлажнения; прогноз вертикальной миграции ^{137}Cs в почве лесных ландшафтов разной степени гидроморфности; прогноз накопления радиоуглерода ^{14}C в компонентах лесного биогеоценоза при различных условиях поступления радионуклида в атмосферу; пользование электронными словарями терминов из области радиационной безопасности, экологии, биогеохимии, лесоведения и почвоведения; пользование электронными пособиями “Введение в радиоэкологию” и “Радиационная безопасность”; получение информации о научных разработках лаборатории радиоэкологии факультета почвоведения МГУ; доступ к базам данных по загрязненным образцам (заполнение, хранение, просмотр имеющейся информации); необязательная регистрация пользователя с запросом информации о месте работы и области интересов и доступ к списку пользователей системы.

Заключение

Наш опыт компьютеризации исследований последствий аварии на Чернобыльской АЭС показал, что эта методология способствует максимальной оперативности и эффективности при проведении подобных масштабных научно-исследовательских работ. Существуют все основания утверждать, что математическое моделирование становится одним из основных методов экологических исследований, а применение информационных технологий их неотъемлемым атрибутом.

Литература

1. Мамихин С.В., Меркулова Л.Н. Компьютеризация исследований динамики

радионуклидов в лесных экосистемах, загрязненных в результате Чернобыльской аварии (1986-1995 гг.) // Радиационная биология. Радиоэкология. - 1996. - Т.36. - Вып.4. - С. 516-523.

2. Тихомиров Ф.А., Мамихин С.В. Математическая модель миграции С-14 в лиственных лесах на дерново-подзолистых почвах // Экология. - 1983. - №3. - С.42-46.

3. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А. Модель многолетней динамики стабильного углерода и С-14 в целинных черноземах степного биогеоценоза // Вестн. Моск. ун-та. Сер.почв. - 1984. - №4. - С.13-18.

4. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А. Математическое моделирование многолетней динамики органического углерода в черноземе типичном агроценоза // Почвоведение. - №8. - 1984. - С. 98-102.

5. Гильманов Т.Г., Мамихин С.В. Математическая модель продукционного процесса в экосистеме илакового белосаксаульника Репетекского заповедника // Проблемы освоения пустынь. - 1986. - №4. - С. 22-31.

6. Мамихин С.В. Математическое моделирование сезонной динамики массы корней дуба // Вестн. Моск.ун-та, Сер.почв. - 1990. - №3. - .17-21.

7. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А. Исследование биогеохимической миграции радиоуглерода с помощью информационно-прогностической системы “ЭКОРАД” // Геохимия. - 2000. - №9. - С. 995-1003.

8. Mamikhin S.V. Mathematical model of Cs-137 vertical migration in a forest soil // J. Environ. Radioactivity. -1995. - Vol.28. - №2. - P. 161-170.

9. Mamikhin S.V., Kliashtorin A.L. Mathematical model of Cs-137 dynamics in the deciduous forest // J. Environ. Radioactivity.- 1999. - Vol. 47, №.1. - P. 101 - 114.

Computerisation of ecological researches

S.V. Mamikhin

Moscow State University, Soil Science Faculty

Vorobjevy Gory, 119899 Moscow, Russia

In a paper the outcomes of a computerization of researches of carbon circulation and radionuclide behaviour of in terrestrial ecosystems, which are carried out in radioecology laboratory of MSU, are submitted. The teleological application of mathematical modelling and information technologies has allowed to analyze data of field works thoroughly, to carry out numerical experiments and to give the prognosis of development of a series of unfavorable ecological situations.