

Мамихин С.В. Проблемы и перспективы создания глобальных радиоэкологических моделей //Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин /Ред. Мигунов В.И., Трапезников А.В.. Вып.8. Заречный, 2006. С. 156 - 173.

## **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**С.В.Мамихин**

Кафедра радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, E-mail: Lrad@soil.msu.ru

В статье обсуждаются предпосылки и перспективы создания и эксплуатации глобальных радиоэкологических моделей. Рассматривается ряд проблем применения метода имитационного моделирования для создания таких моделей и предложения по их решению.

### **Введение**

В настоящее время, в результате бурного развития вычислительных средств и благодаря достижению определенных успехов в разработке радиоэкологических имитационных моделей экосистемного уровня, созданы предпосылки к решению задачи прогнозирования развития ситуаций радиоактивного загрязнения на качественно новом уровне, а именно – к созданию глобальных моделей. Данные модели предназначены для воспроизведения сценариев радиационного загрязнения обширных территорий, на которых располагаются экосистемы различных типов, вплоть до всей поверхности нашей планеты.

Накопленный к данному моменту опыт создания радиоэкологических имитационных моделей со всей очевидностью, как мне представляется, показал, что необходимым элементом таких моделей является модуль, в котором воспроизводится динамика фитомассы, второго по значимости депонирующего компонента после почвы – для наземных экосистем, и после донных отложений – для гидробиоценозов. В этом отношении создание глобальных радиоэкологических моделей непосредственно зависит от создания аналогичных продукционных моделей, а в конечном счете – от создания математической модели биосферы.

Создание адекватной математической модели любого аспекта функционирования биосферы – поистине захватывающая и чрезвычайно перспективная цель, но, в то же время, – это исключительно сложная и трудоемкая работа, которая не может быть выполнена без объединения усилий ученых, работающих в различных областях знаний. Попытки решить задачу построения такой модели предпринимались уже несколько десятилетий, достаточно вспомнить отечественный проект “Тея”, осуществлявшийся в Вычислительном центре АН СССР в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века под руководством Н.Н.Моисеева (Моисеев и др., 1985). Глобальная модель ГЕЯ, разработанная в рамках проекта, позволяла воспроизводить геофизические и биологические процессы, происходящие в биосфере, и дала

возможность провести анализ климатических последствий ядерной войны. Здесь следует отметить, что разработчиками ГЕИ было создано некоторое подобие современных ГИС-систем. Вся поверхность земного шара была разбита на участки меридианами и широтными линиями. Каждый участок был отнесен к одному из 30 рассматриваемых типов экосистем.

Модель была достаточно грубой, в ней также были некоторые весьма спорные допущения. Так, например, в подмодели глобального цикла углерода древесина и корни были объединены в один блок (предполагалось, что скорость их нарастания и отмирания одинакова). Размер участков был очень велик – они представляли собой участки со сторонами по 5\*4 градусов долготы и широты соответственно (около 556\*445 км на экваторе), причем предполагалось, что в каждом прямоугольнике характеристики биоты неразличимы. Все это обусловило очень приближенный характер оценок функционирования биосферы, полученных с помощью данной модели. Тем не менее, основа для дальнейшей разработки подобных моделей была заложена.

Затем последовало дальнейшее развитие подходов в данной области и детализация воспроизведения биосферных процессов. Так, например, субмодель “Экосистема суши” в построенной позднее глобальной модели IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect), предназначенной для оценки воздействия парникового эффекта на биосферу, имеет элементарную ячейку со стороной 0,5 градуса (около 55,6 км на экваторе) (Ризниченко, 2003), что делает прогноз, полученный с помощью данной модели, уже более адекватным.

Помимо воспроизведения гидрометеорологических условия функционирования экосистем и динамики биомассы, важнейшим процессом, определяющим поступление радионуклидов в экосистемы, является распространение радионуклидов в атмосфере. Поскольку моделирование атмосферного переноса радионуклидов не входит в мою компетенцию, отмечу только, что разработан целый ряд моделей описания этих процессов, реализованных в виде компьютерных программ, в частности в ИБРАЭ РАН. Использование подобных программ должно обеспечить входной информацией глобальные радиоэкологические модели.

Опыт создания экологических моделей различной тематики, описывающих пространственно-временную динамику каких-либо экологических явлений, позволяет утверждать, что успешная реализация современной глобальной радиоэкологической модели может быть осуществлена в виде географической информационной системы (ГИС). Такая ГИС должна включать в себя картографическую информацию, банк радиоэкологических имитационных субмоделей, базы данных, необходимых для работы моделей (метеорологические, ландшафтно-геохимические и др.), и общий пакет программ, обеспечивающих работу системы, в том числе и интерфейс для работы с пользователем. Интерфейс должен как минимум по-

звolyть пользователю задавать необходимые начальные и корректирующие условия, а также выводить результат работы модели. Визуально результат работы модели может выглядеть как изображение, состоящее из следующих обязательных слоев:

- координатной сетки;
- топоосновы – контурного изображения рассматриваемого района;
- графического отображения распределенных данных, которые будут представлять собой результаты расчетов имитационных моделей. Динамику развития ситуации можно наглядно представить средствами анимации.

Достаточно подробное теоретическое обоснование построения подобных систем уже приводилось ранее (см. например: Линник и др., 1991), поэтому я не буду останавливаться на этом.

### **Предпосылки и перспективы создания глобальных радиоэкологических моделей**

К настоящему времени имеется ряд достижений в области развития информационно-вычислительных технологий и конкретных разработок в области радиоэкологического моделирования, которые являются реальными предпосылками к созданию таких моделей.

Помимо постоянного наращивания вычислительной мощности широкодоступных персональных компьютеров и увеличения числа суперкомпьютеров, из наиболее значимых, с моей точки зрения, достижений отмечу развитие технологии Grid-инфраструктур, которые позволяют ученым воспользоваться мощными ресурсами вычислительной техники вне зависимости от того, где они находятся. Для организации работы столь обширной системы уже созданы специальные центры инфраструктуры, отвечающие за различные аспекты ее жизнедеятельности: центр управления функционированием грида, региональные операционные центры, центры базовых грид-сервисов, ресурсные центры. В настоящее время реализуется проект EGEE (Enabling Grids for E-science, <http://public.eu-egee.org>), главная цель которого – создание глобальной грид-инфраструктуры. Деятельность ученых внутри проекта в основном сосредоточена на развертывании унифицированной, надежной грид-инфраструктуры, которая может объединить географически удаленные друг от друга ресурсы вычислительной техники. Проект также направлен на постоянное совершенствование качества промежуточного программного обеспечения и привлечение новых пользователей, как из научных, так и из промышленных кругов, на обеспечение высокого уровня их обучения и поддержки при использовании грид-инфраструктуры. Учитывая масштабность проектов по созданию глобальных моделей, эта технология, безусловно, будет способствовать существенному прогрессу в данной области.

Еще одной современной технологией, применение которой может помочь продвижению в этом направлении, является спутниковая навигация (GPS, система глобального позиционирования). Наряду с аэрокосмической фотосъемкой, эта технология неопределима в первую очередь для привязки мест пробоотбора к местности и более детального очерчивания границ биогеоценозов.

К числу несомненных достижений в плане создания глобальных радиоэкологических моделей следует отметить развитие теории применения ГИС-технологий в радиоэкологии и активное внедрение их в практику. В частности, для отдельных регионов, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС, созданы ГИС – чисто радиоэкологические или включающие соответствующие модули, результаты работы которых широко применяются, например, для оценки масштабов и степени радиоактивного загрязнения и его последствий.

Попытки использования ГИС-технологий для описания динамики радионуклидов в окружающей среде и радиационного воздействия на биоту и население и предпринимаются уже на протяжении достаточно долгого периода (например: Вакуловский и др., 1993; Van der Perk et al, 1999; Кутлахмедов, Родина, 2005). Однако расчеты производятся, как правило, с использованием физико-математических моделей, в которых роль биоты практически не учитывается, интерполяционными методами, с привлечением регрессионных уравнений или очень упрощенных имитационных моделей и т.д. Это не позволяет адекватно воспроизводить динамику содержания радионуклидов в экосистемах и радиационного воздействия на биоту и население загрязненных районов и прогнозировать развитие ситуации при изменении условий выпадений в течение рассматриваемого периода. Необходимо, чтобы расчеты производились с помощью надежных имитационных моделей, которые давали бы более точную оценку ситуации по широкому спектру сценариев. Тем не менее, несмотря на недостатки, о которых упоминалось ранее, данные системы могут и должны быть использованы в будущем в качестве организационной и информационной основы для создания глобальных радиоэкологических моделей.

Таким образом, первое, чему следует, как мне представляется, уделить основное внимание на современном этапе – это создание библиотеки алгоритмов описания поведения радионуклидов в основных типах экосистем, встречающихся на рассматриваемых территориях, и радиационного воздействия на биоту, а затем банка радиоэкологических субмоделей экосистемного уровня.

Встает вопрос – почему не сконцентрировать все усилия на создании банка моделей, и для чего необходима библиотека алгоритмов? К сожалению, как, например, это ясно показала международная программа Biomass, существует столь большое разнообразие подходов в построении моделей, а реализация моделей осуществляется настолько разнообразными спо-

собами, что использовать уже построенные модели в рамках глобальных моделей будет очень сложно как методологически, так и технически. Библиотека алгоритмов позволит обобщить представления о поведении радионуклидов в биосфере и об их воздействии на нее. Это, в свою очередь, позволит выработать один или несколько универсальных алгоритмов, на основании которых и будут строиться субмодули для глобальных радиоэкологических моделей. То есть ключевой задачей на данном этапе создания глобальных радиоэкологических моделей, по моему мнению, должны стать наработка и обобщение не моделей экосистемного уровня, а их алгоритмов. Очень желательно при внесении в библиотеку сопровождать описание алгоритма подборкой материалов и списком литературных источников, на основании которых был разработан алгоритм. Это значительно облегчит в дальнейшем работу над моделями. Если на основе алгоритма была создана модель – привести результаты ее проверки, возможно это будет критерием выбора наилучшего алгоритма.

В настоящее время ситуация в этом направлении складывается не лучшим образом. Никаких радиоэкологических библиотек алгоритмов и банков моделей, насколько я знаю, не существует. Модели, созданные до Чернобыльской аварии, немногочисленны, в подавляющем большинстве случаев носят академический интерес и должны быть существенно доработаны, чтобы их можно было использовать практически. Попытки использовать их для оценки последствий аварии на ЧАЭС особым успехом не увенчались (см. например: Muller, Prohl, 1993).

Мы уже отмечали, что Чернобыльская авария придала особый импульс развитию применения этого метода в радиоэкологии и к настоящему моменту создано большое количество разнообразных математических моделей, воспроизводящих динамику содержания радионуклидов в компонентах экосистем (Мамихин, 2005). Имеются даже попытки применить математическое моделирование для описания поведения радионуклидов в системах геохимически сопряженных ландшафтов и водосборах. Однако и эти, более поздние разработки не так совершенны, как хотелось бы.

Каковы особенности современного состояния дел в этой области. Рассмотрим на примере имитационных моделей наземных экосистем. Основное внимание уделим моделированию процессов в системе “ почва – растения ”, поскольку эти процессы определяют дальнейшее распределение радионуклидов в трофической цепи. Если нет адекватного отображения действительности в этом звене, то не имеет смысла говорить о дальнейшем.

Наиболее полно разработанной областью является моделирование поведения радионуклидов в сельскохозяйственных и луговых экосистемах, относительно простых по структуре и функциональным связям между компонентами. Тем не менее, качество моделей и сте-

пень их универсальности, на мой взгляд, не позволяют пока использовать их напрямую в составе глобальных моделей.

Лесные экосистемы менее удобны как объект моделирования. В частности, они характеризуются многоярусностью и включают долгоживущие виды древесной и кустарниковой растительности, способные надолго удерживать наружное загрязнение и имеющих корневую систему, которая глубоко проникает в почву. Эти особенности лесных экосистем и связанные с ними трудности в создании адекватных моделей, до сих пор ограничивают прогресс в данной области моделирования.

После аварии на ЧАЭС под эгидой МАГАТЭ осуществлялся ряд научно-исследовательских программ (VAMP (1988 – 1994), BIOMASS (1996 – 2001), EMRAS (начало – 2003)), посвященных именно моделированию, в рамках которых были разработаны как модели отдельных процессов, так и целостные модели, описывающие поведение радионуклидов в объектах окружающей среды, в том числе и в системах “почва – растения” или “почва – растения – животные”. Несколько математических моделей поведения  $^{137}\text{Cs}$  в экосистемах было разработано в ходе международной программы, реализованной в рамках Межправительственных соглашений между комиссией Европейского сообщества и странами СНГ по вопросам, связанным с ликвидацией последствий аварии на ЧАЭС (1991 – 1995 гг.). Эти модели получили свое дальнейшее развитие при осуществлении различного рода проектов, например BIOMASS (Modelling ....., 2002), SEMINAT (Belli et al, 2000), ECORAD\_Oak (Мамихин, Никулина, Манахов, 2005) и т.д. Модели характеризуются разнообразием подходов к их построению и способов реализации. Хотя общее количество моделей не так велико, что объясняется спецификой проблемы и метода, тем не менее, уже предпринимались попытки анализа и обобщения подходов различных коллективов с целью дальнейшей выработки единого алгоритма построения подобных моделей (Risen et al, 1999; Modelling ....., 2002; Shaw et al, 2005).

Ситуация с моделированием поведения радионуклидов в гидробиоценозах, на мой взгляд, хуже, чем в случае с наземными экосистемами. Хотя, как мне кажется, радиационная гидробиология, если не опережала, то отнюдь не отставала от радиоэкологии наземных экосистем в области моделирования. Достаточно сказать, что «сухопутной» альтернативы книге И.И. Крышева и Т.Г. Сазыкиной, в которой излагались основы математического моделирования поведения радионуклидов в водных экосистемах (Крышев, Сазыкина, 1986), на период ее выхода не было и, к сожалению, нет до сих пор. Наиболее близкий по духу и тематике, прекрасный для своего времени труд В.Л. Анохина (Анохин, 1974), посвященный моделированию миграции радионуклидов в наземных системах, носит гораздо более общий характер, менее конкретен и плохо насыщен примерами моделей, что вполне объяснимо, учитывая

доступность вычислительных средств и слабое использование метода математического моделирования в биологических исследованиях в период, непосредственно предшествовавший написанию книги.

Такое положение с моделированием поведения радионуклидов в гидробиоценозах может быть связано с тем, что водные экосистемы, особенно проточные, требуют больших усилий в плане описания горизонтальной миграции радионуклидов и идентификации параметров процессов, происходящих в гидробиоценозах.

### **Проблемы и способы их решения**

Остановлюсь в первую очередь на том, как, по моему мнению, должна выглядеть радиоэкологическая модель наземных экосистем, поскольку это наиболее близкая мне область, и какие проблемы возникают в связи с реализацией таких моделей.

Обязательным компонентом радиоэкологических моделей должен быть субмодуль воспроизведения соответствующей пространственно-временной динамики органического вещества, поскольку динамика содержания радионуклидов в компонентах биогеоценозов неразрывно связана с динамикой органического вещества в них. Причем шаг в модуле не может быть меньше, чем сутки, учитывая, например, жесткую зависимость дальнейшего поведения многих радионуклидов (в первую очередь, достаточно активно включающихся в биологический круговорот, – радиоцезия и радиостронция) от фенологического состояния фитоценозов, т.е. от времени выпадения, и от гидрометеороусловий. Это в свою очередь требует подключения модулей воспроизведения климатических и метеорологических процессов, оказывающих влияние на внутригодовую (сезонную) динамику органического вещества. Еще одним необходимым компонентом является почвенный модуль, в котором воспроизводились бы как гидротермические условия функционирования биоты, так и процессы трансформации форм радионуклидов в почве. Подобная архитектура построения радиоэкологических моделей была уже достаточно успешно апробирована нами при построении модели поведения  $^{137}\text{Cs}$  в экосистеме дубравы (Мамихин, Никулина, Манахов, 2005). Общая структура модели представлена на рис.1.

Здесь сразу следует отметить, что хотя имитационных моделей круговорота углерода в экосистемах различных типов создано довольно много, подавляющее большинство их непригодно по тем или иным причинам для использования в составе радиоэкологических моделей. Как правило, недостатки подобных моделей объясняются отсутствием исчерпывающей информации об объекте. Это обуславливается большим объемом и высокой стоимостью предварительных полевых и лабораторных исследований, которые надо провести для разработки таких моделей. Попытки усреднить рассматриваемые объекты, использовать универ-

сальные суррогаты локальных моделей, в которых используются усредненные предпосылки и параметры, в данном случае не принесут успеха, поскольку поведение радионуклидов очень чувствительно к различным факторам. Так, например, показано, что интенсивность поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растения одного и того же вид может различаться на порядок в зависимости от степени гидроморфности экотопа, также большое влияние на этот процесс оказывает возраст древостоя, тип почвы и т.д. (Мамихин и др., 1994; Щеглов, 1999; и др.).

Основной проблемой математического моделирования поведения радионуклидов в экосистемах, как и моделирования биологического круговорота углерода, является отсутствие исчерпывающей и надежной информации. Даже в рамках специализированного проекта BIOMASS, предпринятого с целью тестирования работы существующих имитационных моделей динамики  $^{137}\text{Cs}$  в наземных экосистемах, предложенные полевые данные противоречили сложившимся представлениям о поведении радиоцезия в растительном покрове. Получение необходимых надежных данных осложняется в первую очередь спецификой радионуклидов, как объекта исследования, это требует особой методики исследований и тщательной подготовки персонала. Осложняет работу также неоднородность выпадений и необходимость полномасштабного отбора проб. Например, для лесных экосистем это выражается в вырубке одного или нескольких деревьев, и как следствие смещение места следующего отбора на прилегающий участок, на котором может быть иная плотность загрязнения. Ограничиться прижизненным отбором невозможно, поскольку загрязненность компонентов древостоя, особенно древесины, как правило низка и требуется отбор большого объема образца на измерение.

Серьезной проблемой является разнородность информации, получаемой в ходе радиоэкологических исследований. К этому, например, приводит изменение методики ежегодного отбора проб, пусть даже и с целью ее улучшения, что делает даже надежную информацию непригодной к использованию при моделировании временной динамики. Решить эти проблемы можно путем использования методологии компьютеризации исследований, которая предполагает, что еще до начала сбора информации будут выработаны требования к ее унификации и обеспечена возможность использования полученных в ходе полевых исследований данных при разработке математических моделей (Мамихин, 2003; Мамихин, Кулигина, Хомяков, 2005).

Еще одним вопросом, требующим решения, является степень и способ детализации рассматриваемых территорий. Уже понятно, что при построении радиоэкологической модели территория должна разбиваться на отдельные элементы не путем использования координатной сетки, а по типам экосистем с учетом их расположения в сопряженном биогеохимическом ландшафте и на водосборной площади (для биогеоценозов) или по течению реки или

акватории водоема (для гидробиоценозов), т.е. размер и форма пространственного элемента будет зависеть от площади, занимаемой экосистемой определенного типа. Как указывалось ранее, современные технологии (GPS, аэрокосмическая съемка, ГИС и др.) позволяют обеспечить для этого соответствующую информационную основу.

При окончательном синтезе глобальной радиоэкологической модели большие трудности могут возникнуть при организации взаимодействия между субмодулями, описывающими поведение радионуклидов в отдельных элементах рассматриваемого природно-территориального комплекса, и тем более биосферы в целом. Данные затруднения могут быть решены, как мне кажется, путем ступенчатого укрупнения модулей – от отдельной экосистемы к биогеохимическому ландшафту и далее. Это, в частности, может быть сделано на основе уже разработанных радиоэкологических ГИС.

Большую сложность будет представлять создание и интеграция в глобальную модель субмоделей техногенных ландшафтов. Если для природных ландшафтов существуют определенные закономерности поведения радионуклидов и в той или иной степени изучено воздействие на этот процесс основных факторов влияния – природных, то в антропогенных условиях главный фактор влияния – деятельность человека, которая носит весьма неупорядоченный, порой мало предсказуемый характер.

### **Заключение**

На современном этапе, наряду с дальнейшей разработкой теоретических основ создания глобальных радиоэкологических моделей, основными задачами в этом направлении должны стать наработка алгоритмов отображения поведения радионуклидов и их воздействия на биоту в основных типах экосистем, создание библиотеки алгоритмов, обобщение и выработка универсальных алгоритмов, соответствующих основным типам экологических сообществ. Следующей задачей должна стать разработка надежных имитационных моделей на основе этих алгоритмов и интеграция их в единую глобальную модель. Промежуточным этапом может стать создание моделей поведения радионуклидов в природно-территориальных комплексах вокруг объектов – потенциальных источников радиоактивного загрязнения.

По моему мнению, создание адекватных глобальных радиоэкологических моделей может быть осуществлено только в рамках глобальной экологической модели, в которой с достаточной степенью пространственно–временной детализации воспроизводились бы основные биогеохимические процессы, оказывающие определяющее влияние на поведение радионуклидов в биосфере. Создание таких моделей, позволит исследовать и прогнозировать на

количественном уровне ситуации, связанные с радиоактивным загрязнением отдельных регионов планеты или ее биосферы в целом.

### **Библиографический список**

1. Анохин В.А. Моделирование процессов миграции радиоизотопов в ландшафтах. М., Атомиздат, 1974, 144 с.
2. Вакуловский С.М., Шершаков В.М., Голубенков А.В., Баранов А.Ю., Бородин Р.В., Бочков Л.П., Годько А.М., Косых В.С., Крымова Н.В., Мелешкин М.А. Компьютерное информационное обеспечение задач анализа радиационной обстановки на территориях, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // "Радиация и риск", 1993, вып.3, с. 39 – 61.
3. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах. Москва, Энергоатомиздат, 1986, 150 с.
4. Кутлахмедов Ю.А., Родина В.В. Анализ радиоэкологических процессов с использованием геоинформационных технологий // Тезисы докладов международной конференции «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий», Москва, 2005, с. II-6.
5. Линник В.Г., Хитров Л.М., Коробова Е.М. Принципы ландшафтно-геохимического и радиоэкологического картографирования территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (проект «РАДЛАН»). М., 1991, 50 с.
6. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И. Динамика содержания Cs-137 в лесных биогеоценозах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Экология, 1994, 2, с.43-49.
7. Мамихин С.В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., Изд-во Моск. ун-та, 2003, 172 с.
8. Мамихин С.В., Никулина М.В., Манахов Д.В. Механизмы сезонной и многолетней динамики радиоактивных изотопов цезия в экосистеме дубового леса // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин /Ред. Мигунов В.И., Трапезников А.В. Вып.6. Заречный, 2005. С. 292 – 308.
9. Мамихин С.В., Кулигина Е.А., Хомяков Д.М. Компьютеризация исследований в экологии, почвоведении и агрохимии М.: Издательство Московского университета, 2005, 100 с.
10. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М., Наука, 1985, 272 с.

11. Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. Ижевск, Ин-т компьютерных исследований, 2003, 184 с.
12. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. – М.: Наука, 1999 – 268 с.
13. Avila R., Broed R., Pereira A. Ecolego - a toolbox for radioecological risk assessment // Proceedings of the International Conference on the Protection from the Effects of Ionizing Radiation, IAEA-CN-109/80. Stockholm: International Atomic Energy Agency, 2003, pp. 229 - 232.
14. Belli M., Bunzl K., Delvaux B., Gerzabeck M. , Rafferty B., Shaw G., Wirth E. Long-Term Dynamics of Radionuclides in Semi-Natural Environments: Derivation Parameters and Modelling (SEMINAT) // IUR Newsletter, 2000, N 36, pp. 19-21.
15. Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. Biosphere Modelling and Assessment programme. IAEA 2002, 110 p.
16. Muller H.& Prohl G. (1993). ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. Health Phys., 64 (3), pp. 232-252.
17. Riesen T.K., Avila R., Moberg L., Hubburd L. Review of forest models developed after Chernobyl NPP accident. In: Contaminated Forests - Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives, Eds. I. Linkov and W. Schell, NATO Science Series 2. Environmental Security, Vol. 58, 1999, pp. 151-160.
18. Shaw G., Venter A., Avila R., Bergman R., Bulgakov A., Calmon P., Fesenko S., Frissel M., Goor F., Konoplev A., Linkov I., Mamikhin S., Moberg L., Orlov A., Rantavaara A., Spiridonov S., Thiry Y. Radionuclide migration in forest ecosystems - results of a model validation study. J. Environ. Radioactivity, 2005, Vol. 84 , pp. 285 - 296.
19. Van der Perk M., Burema J.R., Gillett A.G., K. de Jong', Van der Meer M.B., Wesseling C.G. Announcing the availability of a CD-rom, containing an Environmental Decision Support System // IUR Newsletter, 1999, N 34, p. 20

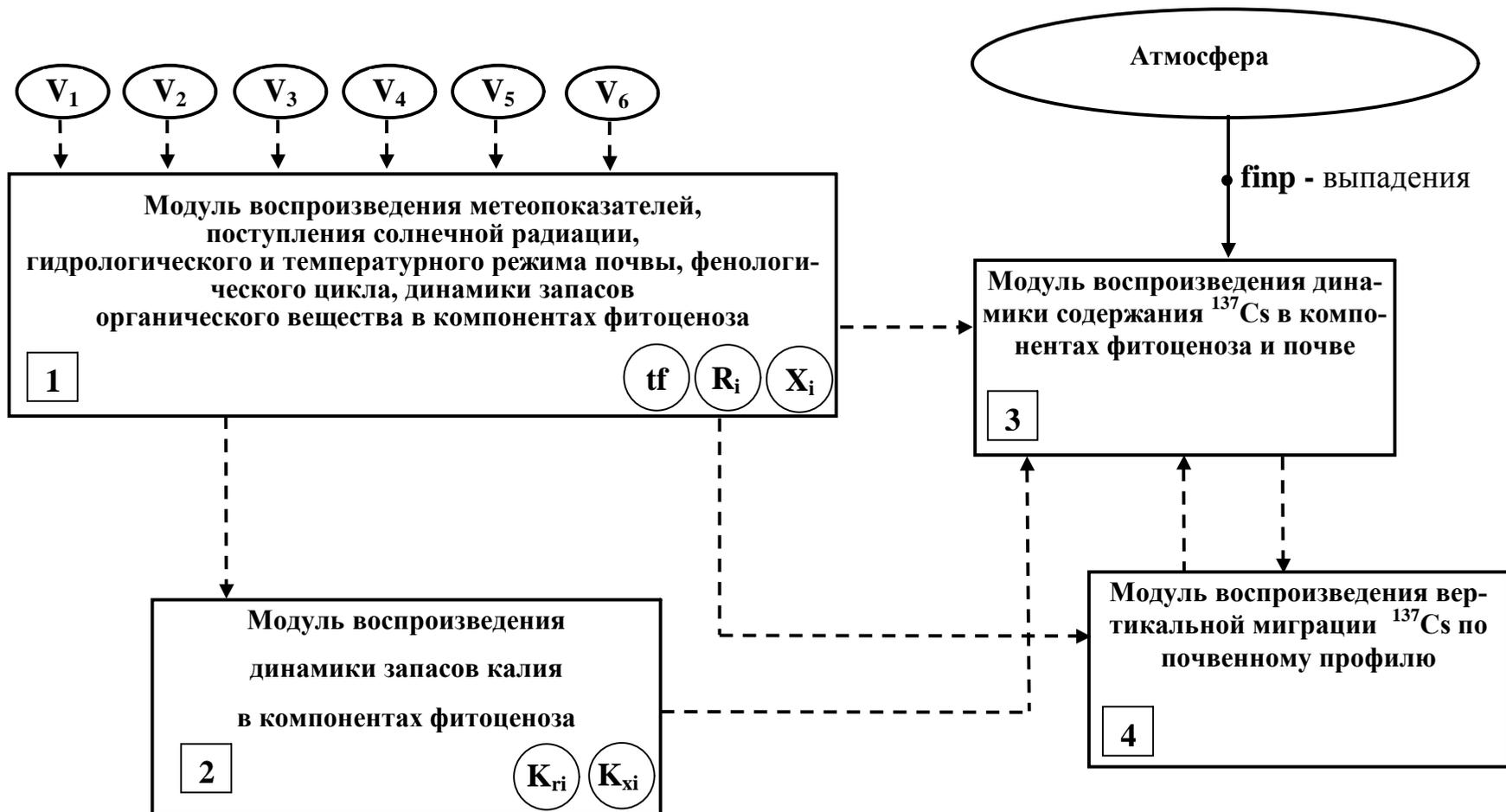


Рис. 1 Структура модели (в эллипсах – входные переменные:  $V_1, \dots, V_5$  (среднемесячные температура воздуха, относительная влажность воздуха, облачность, скорость ветра и месячная сумма осадков); в кружках - переменные, значения которых и величины определяющих их потоков передаются в другие модули:  $tf$  – фенологическое время,  $R_i$  и  $X_i$  – запас органического вещества в корнях и компонентах надземной части древостоя,  $K_{ri}$  и  $K_{xi}$  – запас  $K$  в них).