

Мамихин С.В. Международная кооперация в области математического моделирования поведения радионуклидов в наземных экосистемах //Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин /Ред. Мигунов В.И., Трапезников А.В.. Вып.9. Заречный, 2006. С. 159 - 178.

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ КООПЕРАЦИЯ В ОБЛАСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ**

**С.В.Мамихин**

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

В статье обсуждаются особенности и перспективы международного сотрудничества в области создания и эксплуатации радиэкологических моделей наземных экосистем. На примере реализации программы BIOMASS (1996 – 2001 гг.) рассматриваются достоинства и недостатки таких проектов. Также обсуждается ряд проблем применения метода имитационного моделирования в радиэкологии, и предлагаются предложения по их решению.

### **Введение**

Метод математического моделирования – один из важнейших методов, применяющихся в радиэкологии для изучения и прогнозирования поведения радионуклидов в наземных экосистемах. В то же время это весьма сложная область познания, в которой работает не так уж много специалистов и которая требует привлечения исходной информации из самых разных областей знаний. Это служит естественной предпосылкой для объединения усилий специалистов различного профиля из разных стран. Особенно активизировалась международная кооперация в данной области после аварии на Чернобыльской АЭС, которая непосредственно затронула целый ряд стран. Было реализовано несколько международных радиэкологических проектов, в ходе которых использовался метод математического моделирования. Так, например, 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.) были разработаны математические модели поведения  $^{137}\text{Cs}$  в наземных экосистемах. МАГАТЭ в течение ряда лет инициирует научно-исследовательские программы по радиэкологическому математическому моделированию (VAMP (1988 – 1994), BIOMASS (1996 – 2001), EMRAS (начата в 2003)), в рамках которых были разработаны и разрабатываются как модели отдельных процессов, так и целостные модели,

описывающие поведение радионуклидов в системах “почва – растения” или “почва – растения – животные”. Работа по созданию моделей, построенных с учетом опыта чернобыльских исследований, продолжается и по сей день.

Каковы же преимущества, проблемы и перспективы международной кооперации в данной области? Попробую рассмотреть этот вопрос на примере уже завершенной программы BIOMASS (Modelling ..., 2002), в которой мне довелось непосредственно участвовать.

### **Программа BIOMASS**

Кратко остановлюсь на содержании программы и подтемы, на примере которой мы будем рассматривать наши вопросы. Программа BIoSphere Modelling and ASSESSment включала в себя три темы: "Захоронение радиоактивных отходов", "Выбросы в окружающую среду", "Биосферные процессы". В рамках последней темы, посвященной моделированию поведения радионуклидов в окружающей среде, было выделено 3 рабочих группы по следующим подтемам: (1) долгосрочное перераспределение трития в окружающей среде, (2) поступление радионуклидов во фрукты, (3) миграция и аккумуляция радионуклидов в лесных экосистемах. В программе принимали участие отдельные ученые и небольшие коллективы из разных стран, иногда даже интернациональные.

Поскольку я участвовал в работе последней, третьей группы и наиболее хорошо осведомлен о ходе реализации программы именно этой группой, вся последующая конкретная информация по программе будет относиться к подтеме "Миграция и аккумуляция радионуклидов в лесных экосистемах". Рассматривалось поведение  $^{137}\text{Cs}$  в экосистеме соснового леса. Главными целями работы были:

- сравнение между собой алгоритмов моделей;
- тестирование моделей на предлагаемом сценарии;
- проверка работы моделей по независимым данным;
- выработка рекомендаций по развитию данного направления в радиоэкологическом моделировании.

Реализация сравнения и проверки работы моделей проводилась в три этапа. Общее количество моделей было, к сожалению не так велико, как хотелось бы, что впрочем, отчасти объясняется спецификой проблемы и метода. На первом этапе, в моделировании ситуации, аналогичной чернобыльскому сценарию, приняли участие 10 моделей. На втором этапе – в тестировании по независимым показателям приняли 9 моделей. На третьем – в изучении поведения моделей при реализации сценария выращивания

сосновых насаждений на песчаном грунте, под которым находились захоронения радиоактивных отходов – 7 моделей. Модели характеризовались разнообразием подходов, как к их построению, так и к способу их реализации. Основное отличие моделей состояло в количестве компонентов экосистемы, для которых воспроизводилась динамика содержания радиоцезия, и в предпосылках, составляющих основу моделей. Результаты моделирования на каждом этапе статистически обрабатывались, что, как предполагалось, должно было позволить сделать определенные выводы по общим характеристикам моделей.

В ходе реализации программы выявились как определенные недостатки разного рода, так и несомненные успехи.

Наиболее неудачным, с моей точки зрения, можно считать выбор независимых данных для тестирования моделей. Эти данные по ряду пунктов явно противоречили уже сложившимся представлениям о поведении  $^{137}\text{Cs}$ , в том числе и чернобыльского происхождения, в растительности и почвенном покрове лесных экосистем. Вряд ли можно считать надежной информацию, свидетельствующую о практически равной удельной активности коры и древесины. Также сомнительными представляются данные по динамике удельной активности компонентов растительного покрова. Так в древостое в течение 1996–1997 гг., двух последних лет наблюдений, наблюдается скачкообразный (до 2–3 раз) подъем содержания радиоцезия практически во всех фракциях, загрязнение которых обусловлено в основном корневым поступлением, – древесина, побеги, хвоя. В травянистой же растительности и плодовых телах грибов, загрязнение которых в эти года также было обусловлено именно поступлением из почвы  $^{137}\text{Cs}$ , такого скачка не наблюдается. Найти этому объяснение трудно, поскольку по тем же данным основная масса радионуклида не вышла за пределы слоя, в котором находятся корни травянистых растений и мицелий грибов. С моей стороны единственное предположение по этому поводу – модельные деревья в 1996–1997 гг. отбирались пусть даже и на соседних, но более загрязненных участках, что вполне возможно с учетом мозаичности выпадений. Чтобы избежать упреков в субъективности, привожу эти данные в оригинале (Табл. 1), чтобы читатель мог сам их оценить, тем более что эта информация может представлять самостоятельную ценность. Данные приведены с некоторыми купюрами (только средние значения).

Табл. 1 EXPERIMENTAL DATA FOR MODEL-DATA INTERCOMPARISON STUDY

(Provided by A Orlov, Poleskaya Forest Scientific Research Station, Zhitomir, Ukraine)

Specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in samples on experimental plot 15 (61)

Type of sample

Specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in samples,  $\text{Bq kg}^{-1}$

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Pine-tree (d.w.)						
Bark external (d.w.)						
6043	5661	4403	4300	4285	3730	3350
Bark total (d.w.)						
6150	5870	5210	4600	1792	4320	4170
Bark internal (bast) (d.w.)						
5920	7200	6956	6600	7518	9047	9857
Wood (without bark)						
1665	1247	1382	1453	1493	2811	2540
Annual shoots (d.w.)						
20473	35878	11248	16872	14851	54619	62500
Annual needles (d.w.)						
21090	35384	14097	15610	16542	41423	43330
Berries (f.w.)						
<i>Vaccinium myrtillus</i>						
10050	6290	6994	7437	6865	5988.6	5560
All above-ground phytomass (d.w)						
57927	56720	48180	34358	42458	38161.2	40155.2
Mushrooms						
<i>Xerocomus badius</i> (d.w.)						
4065380	4082000	3660550	3832800	3522000	3556000	3478000
<i>Suillus luteus</i> (d.w.)						
3723300	3340000	3510000	3378000	3412000		
<i>Cantharella cabarius</i> (d.w.)						
1235580		1089000		109800	923400	
<i>Boletus edulis</i> (d.w.)						
628200			583300			631200
<i>Russula paludosa</i> (d.w.)						
1853500	1283220	1436800	1725800	1628700	1543800	1266000

Сильно варьировала осведомленность участников о процессах, происходящих в лесных биогеоценозах при радиоактивном выпадении. Так, например, некоторые участники при построении моделей вообще проигнорировали важнейший факт наличия наружного загрязнения растительности. Это очень заметно по расчетным кривым динамики содержания радиоцезия в хвое, полученным с помощью различных моделей (Рис. 1). В предложенной двумя участниками в ходе реализации программы "матрицы взаимодействий" (interaction matrix), которая должна была наглядно представить процессы перераспределения  $^{137}\text{Cs}$  в экосистеме и в какой-то мере обобщить наши знания в данной области, отсутствовали важнейшие компоненты растительного покрова – корни и ветви. Причем если древесина подразделялась на живую и мертвую, то кора была представлена

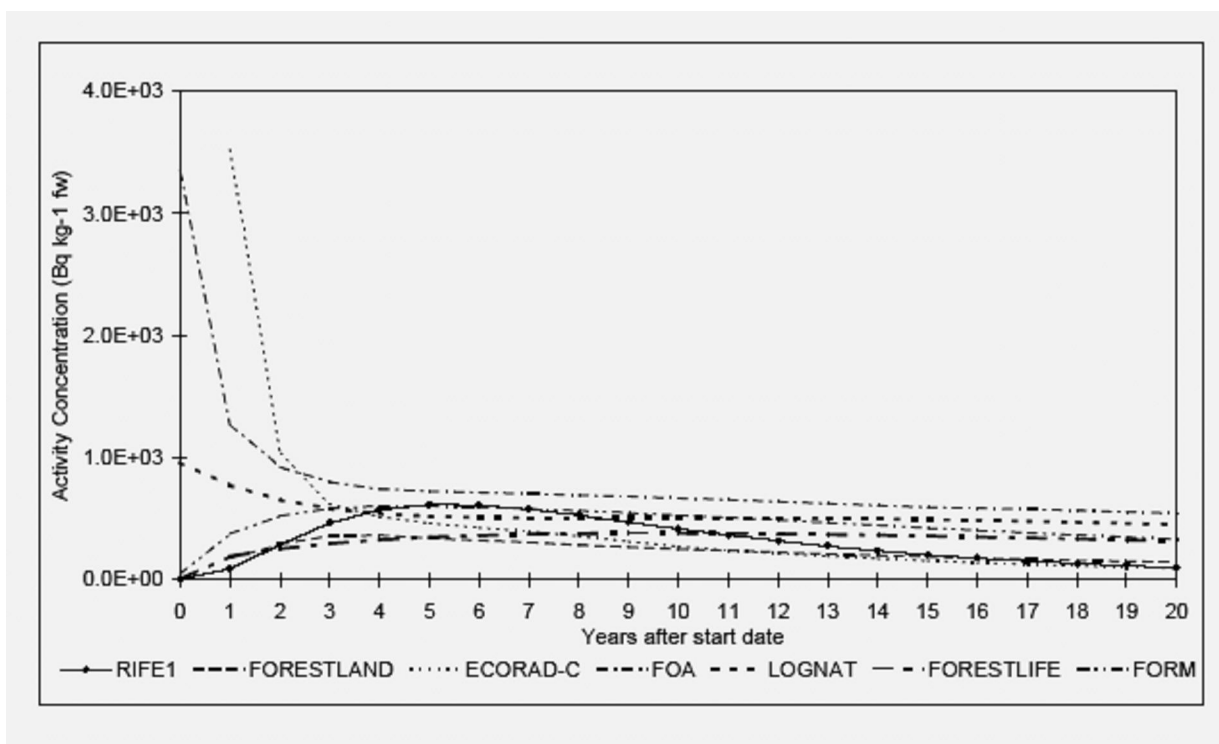


Рис. 1 Воспроизведение различными моделями динамики загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  хвои (чернобыльский сценарий).

только наружной фракцией, хотя внутренняя кора (луб) принимает очень активное участие в процессах трансформации радиоцезия.

К сожалению, организаторы проекта только в самом конце программы предложили участникам дать описание моделей. Они также не определили четко форму и объем описания, поэтому его никак нельзя считать исчерпывающим по подавляющему большинству моделей, в том числе и моей.

Список недостатков можно было бы продолжать, но, как мне кажется, при таком разнообразии подходов и квалификации участников, а также чрезвычайной сложности задач, таких явлений невозможно избежать. Следует также учитывать, что большинство моделей уже были созданы до начала программы и для различных целей, и поэтому не могли учитывать все детали предложенных сценариев. Для разработки серьезных моделей, требуется гораздо больше времени, чем это отводилось для реализации программы, особенно, если учитывать, что у участников программы наверняка были и другие важные исследования.

Гораздо более важными являются преимущества, которые научное радиэкологическое сообщество получило в ходе реализации программы. В целом, с моей точки зрения, как непосредственного участника всех трех этапов, была проделана очень полезная работа.

Стало очевидно, что хотя попытки отдельных ученых или даже небольших

коллективов, работающих над созданием радиоэкологических моделей, не привели пока к созданию надежных универсальных алгоритмов отображения поведения  $^{137}\text{Cs}$  в лесных экосистемах, произошедший обмен опытом позволяет оценить ситуацию в данной области, как устойчиво прогрессирующую. По сравнению с предыдущими аналогичными проектами BIOMOVS и VAMP, модели носят более конкретный характер и основаны на более надежной информации. В этом сыграло свою роль активное внедрение методологии компьютеризации в радиоэкологические исследования, связанное со все более широким доступом радиоэкологов к информационно-вычислительным технологиям. С организационной точки зрения программа оказалась, как мне кажется, весьма успешной. По опыту программы можно уверенно утверждать, что реализация таких проектов дистанционно, с помощью сетевых технологий является исключительно удобным способом их осуществления. Это особенно ценно в свете того, что проведение подобного рода программ растянуто во времени, поскольку даже при наличии работающих моделей приходится уделять много времени адаптации их под конкретные задачи. Участники непосредственно встречались только в рамках краткосрочных организационных встреч и семинаров. Конечно, еще более удобным способом согласования позиций являются сетевые конференции, но на тот период далеко не все участники, в том числе и я, могли этим воспользоваться. Языкового барьера в ходе реализации программы не ощущалось, общение происходило на английском языке, отчеты компоновались и редактировались носителями языка.

Очевидно, что реализация таких программ как BIOMASS способствует гораздо более быстрому и целенаправленному обмену опытом между единомышленниками, чем традиционное опубликование в периодических изданиях. Лично я, даже несмотря на достаточно скупое описание моделей и невозможность прямого контакта с коллегами по программе, смог почерпнуть из материалов проекта весьма полезную для меня информацию.

При подведении итогов программы, в первую очередь, было отмечено, что основным лимитирующим фактором является недостаток информации о процессах, имеющих место в загрязненной экосистеме. По результатам программы были предприняты попытки анализа и обобщения подходов различных коллективов с целью дальнейшей выработки единого алгоритма построения подобных моделей (Modelling ....., 2002; Shaw et al, 2005). Был сформулирован целый ряд критических замечаний по поводу ранее использовавшихся подходов к расчету загрязнения растительного покрова, например с помощью коэффициентов перехода. Были также разработаны рекомендации по дальнейшей работе в данной области с учетом опыта программы.

## **Некоторые проблемы имитационного моделирования в радиоэкологии**

Проведенная в рамках программы BIOMASS работа позволила заново очертить проблемы, которые препятствуют созданию более надежных и универсальных моделей. Поэтому хотелось бы в этой статье еще раз коснуться некоторых аспектов имитационного моделирования в радиоэкологии, в частности затронуть вопрос о моделях и алгоритмах. Я уже обращался к этому вопросу при обсуждении модели поведения  $^{90}\text{Sr}$  в лесном биогеоценозе (Мамихин, Никулина, 2005), но данные проблемы характерны для всего радиоэкологического моделирования, в том числе и в рамках международной кооперации. Итак, если исходить из положения, что алгоритм – это не просто способ программной реализации модели, а совокупность правил, составляющих основу модели, по которым, как предполагается, ведет себя объект моделирования, то адекватность поведения модели дает основания полагать, что алгоритм, положенный в ее основу, близок к реальному поведению данного объекта и может быть использован для объяснения особенностей его функционирования. В ряде случаев это позволяет уточнить действительные механизмы рассматриваемых явлений – вычленить значимые процессы, определить их направление и интенсивность, выявить доминирующие факторы, оказывающие влияние на поведение объекта, и т.д. На одном и том же алгоритме могут строиться модели, использующие разный математический аппарат, по-разному реализованные и обладающие, соответственно, разными функциональными возможностями. Это придает алгоритмам самостоятельную значимость и объясняет существование справочников и электронных библиотек алгоритмов различных явлений и процессов во многих отраслях знаний.

На мой взгляд, уже созрела настоятельная необходимость в международном банке радиоэкологических алгоритмов, в котором можно было бы накапливать и обобщать представления различных исследователей о закономерностях радиоэкологических явлений и процессов в удобной для сопоставления и широкодоступной форме. Как мне кажется, радиоэкологи, как непосредственно занимающиеся разработкой моделей, так и экспериментаторы, могли бы почерпнуть из такого банка информацию, которая будет полезна и в моделировании, и при планировании полевых и лабораторных исследований в данной области и анализе их результатов. Также они могли бы поделиться своими идеями с коллегами не только путем публикаций в журналах и сборниках, но и более быстрым и эффективным способом через Интернет.

Известно, что общим препятствием к созданию имитационных моделей, которые адекватно отражали бы поведение радионуклидов в наземных экосистемах различных типов, является отсутствие надежной информации для калибровки и проверки моделей, в

первую очередь, динамических данных. Многолетних исследований поведения радионуклидов в наземных экосистемах проводилось не так уж много, поэтому их результаты представляют особую ценность и заслуживают обобщения в широко доступной форме. Думаю, в этом могло бы помочь создание банка исходных данных для радиоэкологического моделирования.

В условиях острого недостатка исходных данных одним из вариантов является использование косвенной информации, в частности данных по круговороту стабильных изотопов и химических аналогов радионуклидов. Конечно, есть причины, которые заставляют с осторожностью относиться к этому варианту. Например, аналогичность поведения  $^{90}\text{Sr}$ , стабильного Sr и Ca в растительном покрове экосистем неоднократно доказана и очевидна (см. например Гулякин, Юдинцева, 1973). При рассмотрении же процесса поглощения растениями  $^{90}\text{Sr}$  из почвы, отмечаются значительные расхождения, которые объясняются в частности тем, что радионуклиды поступают в почву в виде микроколичеств и, как правило, в иной форме, чем элементы, которые уже присутствуют в почве. Показано, что в этом случае их поведение может значительно отличаться от поведения даже стабильных изотопов этих же элементов (Алексахин, 1963, Молчанова И.В., Караваева Е.Н., 2001). Тем не менее, будет очень полезно создать общий банк данных по поведению стабильных изотопов и химических аналогов, наиболее опасных в биологическом отношении радионуклидов, в совокупности с данными по продукционным характеристикам для конкретных экосистем. Например, что-то наподобие информационной системы ЭКОПРОД (Мамихин, 2003). Структура базы данных, входящей в состав ИС ЭКОПРОД, и пример записи из этой базы представлены в Табл. 2. Указанная база на настоящий момент включает 378 записей и распространяется в рамках оказания научно-методической помощи заинтересованным учреждениям и организациям.

Табл. 2. Структура базы данных ЭКОПРОД

Поля с информацией общего характера:

Поле	Содержание
ECOSYSTEM	Тип экосистемы
SOIL	Тип почвы
PLACE	Регион
COMPOSIT	Видовой состав
TREE_AGE	Средний возраст древостоя
NOTES	Примечания
REFERENCE	Источник

Поля с данными о запасах:

Органическое вещество	Кальций	Калий	Содержание



UNIT	CA_UNIT	K_UNIT	Единицы измерения
WOOD	CA_WOOD	K_WOOD	Древесина ствола
BARK	CA_BARK	K_BARK	Кора ствола
BOLE	CA_BOLE	K_BOLE	Ствол в целом
BRANCHES	CA_BRANCHES	K_BRANCHES	Ветви
LEAVES	CA_LEAVES	K_LEAVES	Листья
NEEDLE	CA_NEEDLE	K_NEEDLE	Хвоя
GENERATIVE	CA_GENERATIVE	K_GENERATIVE	Генеративные органы
ROOTS_L	CA_ROOTS_L	K_ROOTS_L	Крупные корни
ROOTS_S	CA_ROOTS_S	K_ROOTS_S	Мелкие корни
ROOTS	CA_ROOTS	K_ROOTS	Корни в целом

Пример записи из базы данных ЭКОПРОД

ECOSYSTEM:	Pinetum vacciniosum, сосняк-брусничник		
SOIL:	дерново-подзолистые песчаные		
PLACE:	Белоруссия, Припятский заповедник		
COMPOSIT:	8Сосна1Береза1Дуб		
TREE_AGE:	65		
UNIT:	Т абс. сух. массы		
WOOD:	95.6		
BARK:	13.3		
BOLE:	0		
BRANCHES:	11.14		
LEAVES:	0.83		
NEEDLE:	3.28		
GENERATIVE:	0		
ROOTS_L:	19.954		
ROOTS_S:	3.886		
ROOTS:	23.84		
CA_UNIT:	% к сух. в-ву		
CA_WOOD:	Сосна - 0.249	Береза - 0.154	Дуб - 0.222
CA_BARK:	Сосна - 0.586	Береза - 0.555	Дуб - 2.0
CA_BOLE:			
CA_BRANCHES:	Сосна - 0.597/0.485	Береза - 0.78/0.65	Дуб - 1.404/1.
CA_LEAVES:	Береза - 1.005	Дуб - 0.887	
CA_NEEDLE:	Сосна - 0.364/0.615		
CA_GENERATIVE:			
CA_ROOTS_L:	Древесный ярус - 0.829		
CA_ROOTS_S:	Древесный ярус - 0.845		
CA_ROOTS:			
K_UNIT:	% к сух. в-ву		
K_WOOD:	Сосна - 0.035	Береза - 0.066	Дуб - 0.923
K_BARK:	Сосна - 0.118	Береза - 0.125	Дуб - 0.205
K_BOLE:			
K_BRANCHES:	Сосна - 0.257/0.16	Береза - 0.3/0.169	Дуб - 0.291/2
K_LEAVES:	Береза - 0.803	Дуб - 0.923	
K_NEEDLE:	Сосна - 0.697/0.364		
K_GENERATIVE:			
K_ROOTS_L:	Древесный ярус - 0.143		
K_ROOTS_S:	Древесный ярус - 0.232		

K_ROOTS:	
NOTES:	ветви - мелкие/крупные; хвоя - однолетняя/старая
REFERENCE:	Экспериментальные исследования ландшафтов Припятского заповедника. Минск, Наука и техника, 1976, 304 с.

Таким образом, опыт международных программ подтверждает, что для построения более надежных математических моделей необходимо проведение дальнейших исследований поведения радионуклидов в наземных экосистемах с позиций системного анализа, как основополагающей научной концепции, с использованием компьютеризации исследований, как научной методологии, обеспечивающей требуемую унификацию и полноту информации, а также максимальную эффективность работ. Необходимым условием успеха является наработка различных версий алгоритмов независимыми группами исследователей с последующим их анализом и обобщением в виде библиотеки алгоритмов.

Перспективными, с нашей точки зрения, шагами в направлении совершенствования алгоритмов отображения поведения радионуклидов в наземных экосистемах может служить, в первую очередь, следующее:

- Рассмотрение процессов перераспределения радионуклида в рамках внутри годичной динамики со снижением шага до одних суток и менее. Это позволит более полно учитывать взаимно компенсирующие потоки переноса радионуклида в экосистемах.
- Более тесная интеграция радиоэкологического модуля с модулем динамики органического вещества, что даст возможность более адекватно учесть роль органического вещества, как физического носителя радионуклидов. Постепенный отказ от феноменологической интерпретации поведения радионуклида в организмах в пользу физиологической точки зрения. Вычленение компонентов древостоя, существенно различающихся по физиологии (например, отдельное рассмотрение поведения радионуклидов в “наружной” коре (мертвые покровные ткани, ритидом) и “внутренней” коре (живая флоэма, луб)).
- Включение в алгоритм правил перераспределения радионуклидов в системе “почва – растение” в соответствии с фенологическими циклами растений – доминантов.

Наш опыт построения модели посуточной динамики  $^{137}\text{Cs}$  в экосистеме дубравы (Мамихин, Никулина, Манахов, 2005) показал, что такой подход позволяет более реально отображать поведение радионуклидов и проводить численные эксперименты по изучению действительных механизмов их перераспределения в экосистемах.

## **Заключение**

Опыт проведения программы BIOMASS был признан МАГАТЭ положительным, что дало основания для начала в 2003 году новой программы по радиоэкологическому моделированию EMRAS (Environmental Modelling for RAdiation Safety). Причем круг вопросов был значительно расширен, также был расширен и спектр рассматриваемых радионуклидов. Позволю себе привести в оригинале список предлагавшихся тем (Табл. 3). Схема работы участников в рамках данной программы, судя по получаемым мной информационным материалам, осталась примерно такая же, как и при реализации BIOMASS. Это свидетельствует об уже достигнутых успехах международного сотрудничества в данной области.

Но, с другой стороны, опыт реализованных международных программ показывает, что радиоэкологическое моделирование до сих пор остается уделом очень ограниченного числа исследователей, и это несмотря на все неоспоримые достоинства применения метода математического моделирования в экологии и на бурное развитие вычислительных средств и широкий доступ к ним. Думается, что необходимо всемерно способствовать повышению интереса к моделированию среди молодых ученых еще в процессе их обучения в ВУЗах. Курсы экологической информатики и применения информационно-вычислительных технологий в экологических исследованиях должны читаться как можно раньше, сразу после общих дисциплин, чтобы студенты могли на практике испробовать этот метод при выполнении курсовых и дипломных работ и оценить его преимущества по сравнению с традиционными методами.

Для заинтересованных лиц доступен отчет по программе BIOMASS, подтема "Миграция и аккумуляция радионуклидов в лесных экосистемах", а также заключительная аналитическая статья (Shaw et al, 2005) в виде PDF-файлов (1,4 и 0,2 Мб). Также теперь доступна в PDF-варианте (2,5 Мб) моя монография "Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий)", где приводится достаточно подробное описание модели, с которой я участвовал в программе BIOMASS.

Табл. 3 Список тем и рабочих групп, предлагавшийся потенциальным участникам программы EMRAS.

THEME 1: Radioactive Release Assessment	
<i>Tasks/Working Groups:</i>	
1.	Revision of IAEA Technical Report Series No. 364, "Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments".
2.	Modelling of tritium and carbon-14 transfer to biota and man.
3.	Model validation for radionuclide transport in fruit plants and forest ecosystems: application of the experimental data sets and assessment of management options.
4.	The Chernobyl <sup>131</sup> I release: model validation and assessment of the countermeasure effectiveness.
5.	Model validation for radionuclide transport in the system: "Watershed-River".
6.	Model validation for radionuclide transport in estuaries.
THEME 2: Remediation of Sites with Radioactive Residues	
<i>Tasks/Working Groups:</i>	
1.	Modelling of naturally occurring radioactive materials (NORM) releases and of the remediation benefits for sites contaminated by extractive industries.
2.	Remediation assessment for urban areas contaminated with dispersed radionuclides.
3.	Remediation assessment for inhabited areas contaminated with radionuclides due to the Chernobyl accident - <i>possibly within the frame of TC Project RER/9/074.</i>

### Литература

1. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 132 с.
2. Гулякин И.В., Юдинцева Е.В. Сельскохозяйственная радиобиология. М., Колос, 1973, 272 с.
3. 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.
4. Мамихин С.В., Никулина М.В. Имитационная модель поведения <sup>90</sup>Sr в почве и древесном ярусе соснового леса // Радиационная биология. Радиоэкология., т. 45, №4, 2005, с. 218 – 226.
5. 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.
6. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Ретроспективный обзор экспериментальных исследований поведения радионуклидов в почвенно-растительном покрове. // Проблемы

радиоэкологии и пограничных дисциплин /Ред. А.В.Трапезников, С.М.Вовк. Вып.4. Заречный, 2001. С. 37 – 91.

7. Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. BIOSphere Modelling and ASSEsment programme. IAEA 2002, p. 127.

8. 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.