

# Физико-математическое моделирование поведения радионуклидов

В. А. Борзилов



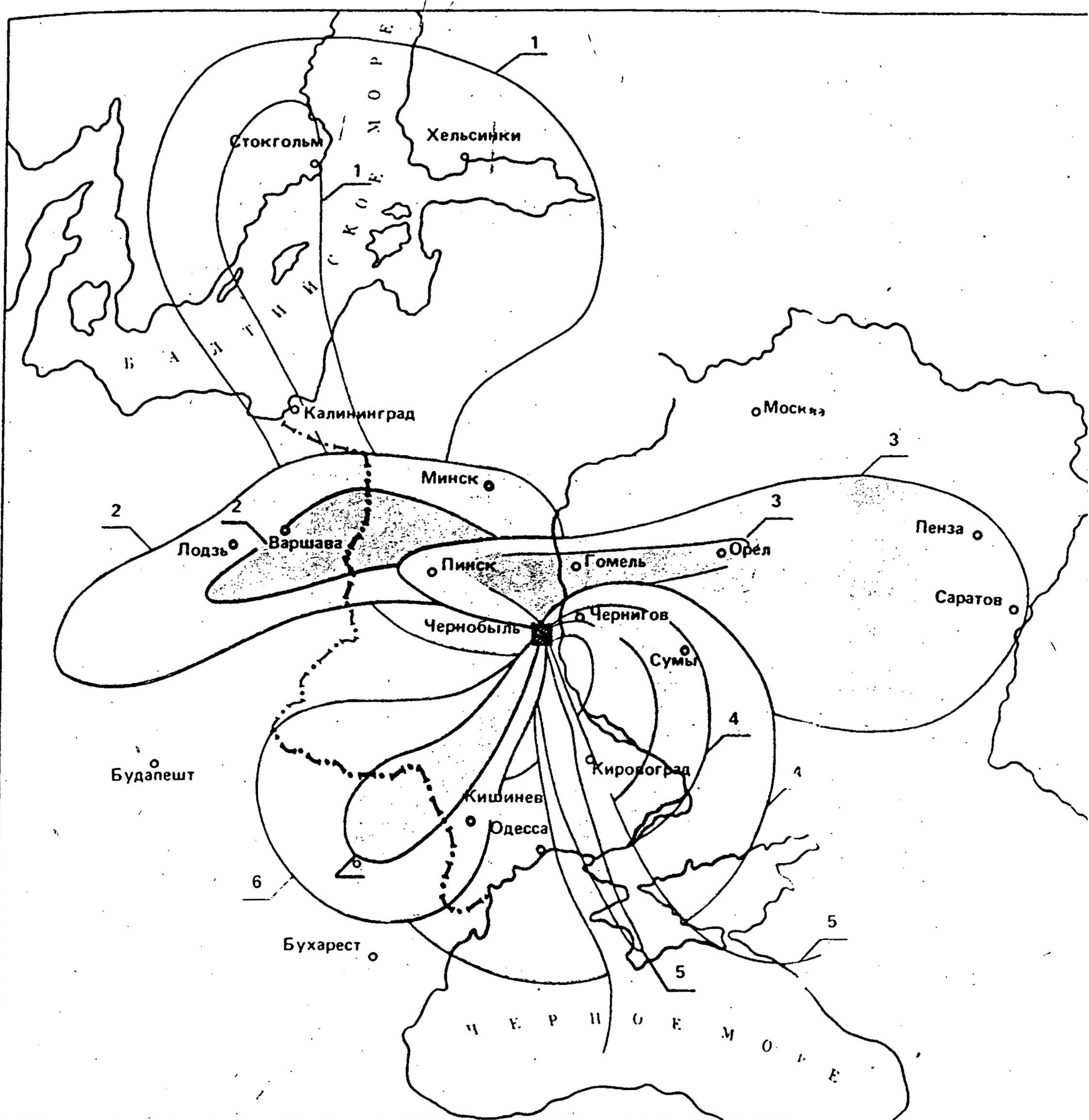
Владимир Андреевич Борзилов, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун» Госкомгидромета СССР. Область научных интересов — физико-математическое моделирование поведения загрязняющих веществ в окружающей среде.

**С** ПЕРВЫХ ДНЕЙ после аварии НПО «Тайфун» и другие институты Госкомгидромета СССР должны были контролировать радиационную обстановку, складывающуюся в результате распространения радионуклидов от разрушенного реактора. Для этого в 30-километровой зоне велась аэро-гаммасъемка и специальными экспедиционными отрядами отбирались пробы, которые затем переправляли в НПО «Тайфун» и анализировали там на содержание радионуклидов. Одновременно в объединение поступала информация с разбросанных по всей стране пунктов сети Госкомгидромета: примерно с 2000 пунктов — о мощности  $\gamma$ -дозы, с 500 — о плотности выпадений радионуклидов на специальные планшеты и со 100 — о концентрациях радионуклидов в воздухе. К сожалению, в самом районе аварии плотность контрольных пунктов была невелика.

Поскольку активный выброс радионуклидов из разрушенного реактора продолжался примерно 10 дней и за это время существенно менялись как метеорологическая ситуация, так и условия в самом реакторе, разобраться с помощью недостаточной и запаздывающей информации в сложной картине формирования полей загрязнения было трудно. Поэтому сразу после аварии мы приступили к математическому моделированию атмосферного переноса радионуклидов, выброшенных из реактора, и их осаждения на подстилающую поверхность.

При этом ставилось несколько целей. Во-первых, понять, как день за днем формировалось загрязнение. Во-вторых, проанализировать, как метеорологические факторы и характер самого источника сказались на переносе и осаждении радионуклидов. В-третьих, выделить особенно загрязненные участки для первоочередного обследования.

Как видно, с самого начала предстояло оценивать уже сложившуюся ситуацию, т. е. решать задачу диагноза, а не прогноза. Причина этого — технологическая неготовность к проведению расчетов в масштабе времени, необходимом для прогноза. К слову, ни в одной стране мира не нашлось гото-

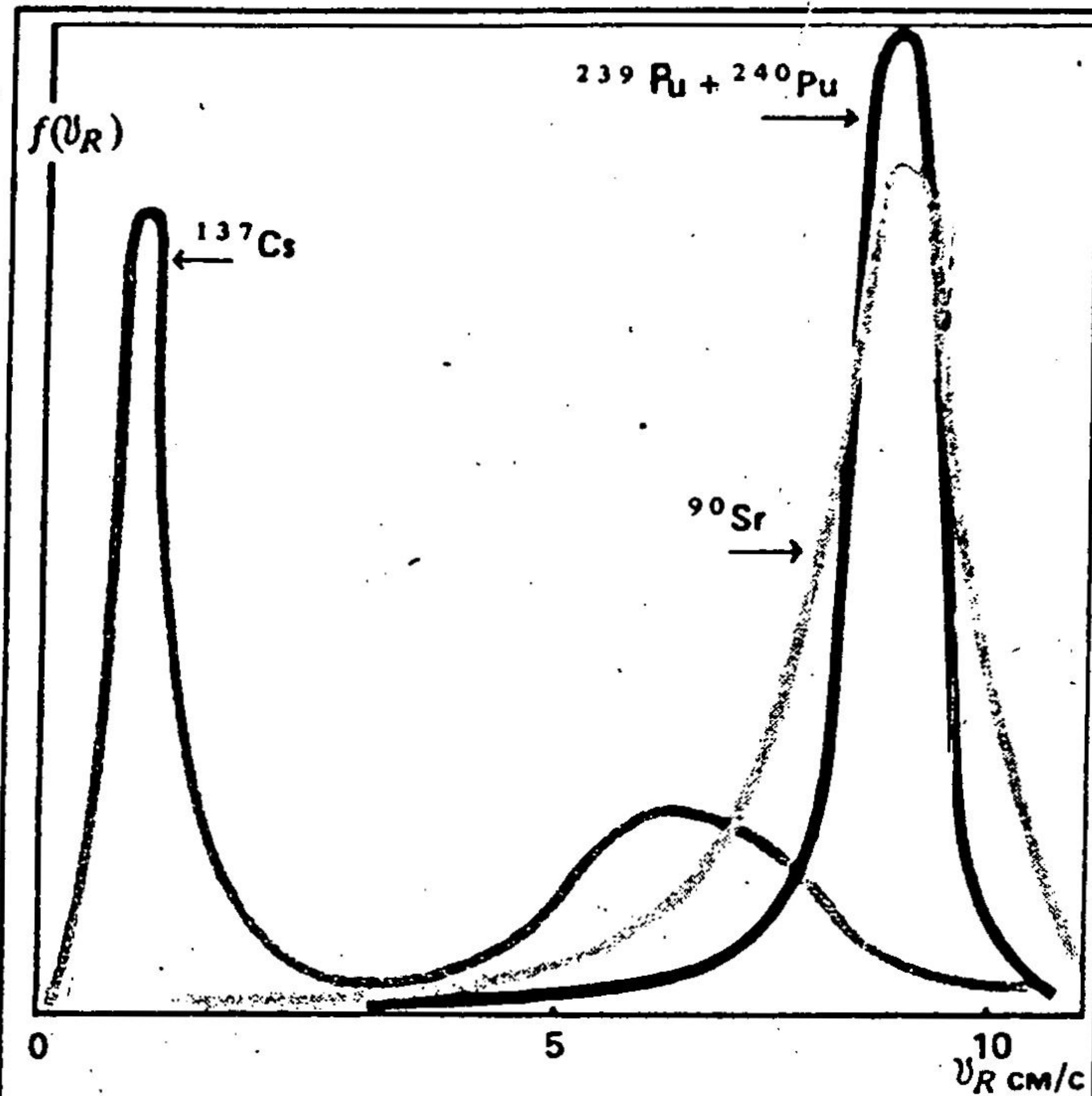


Основные этапы формирования следа радиоактивных выпадений  $^{131}\text{I}$  в первые дни после Чернобыльской аварии за счет изменения метеоусловий. Цифрами обозначены расчетные поля выпадений (следы) от мгновенных выбросов радионуклидов: 1 — 26 апр. 0 час. (по Гринвичу); 2 — 27 апр. 0 час.; 3 — 27 апр. 12 час.; 4 — 29 апр. 0 час.; 5 — 2 мая 0 час.; 6 — 4 мая 12 час. Интенсивность окраски качественно соответствует плотности выпадений.

вых технологий для выдачи количественного прогноза при масштабах переноса, характерных для этой аварии. Тем не менее прогноз траекторий переноса воздушных масс готовился как за рубежом, так и у нас в стране (в частности, в Гидрометцентре СССР).

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Примерно за два года до Чернобыльской аварии у нас в объединении начали разрабатывать методы быстрого реагирования на аварийное загрязнение. В их основе — комплекс моделей атмосферного переноса в разных масштабах (200, 2000 и 4000 км). Причем с самого начала модели были ориентированы на применение в реальном масштабе времени и использовали только стандартную метеорологическую информацию, применяемую в Гидрометцентре для прогноза погоды.

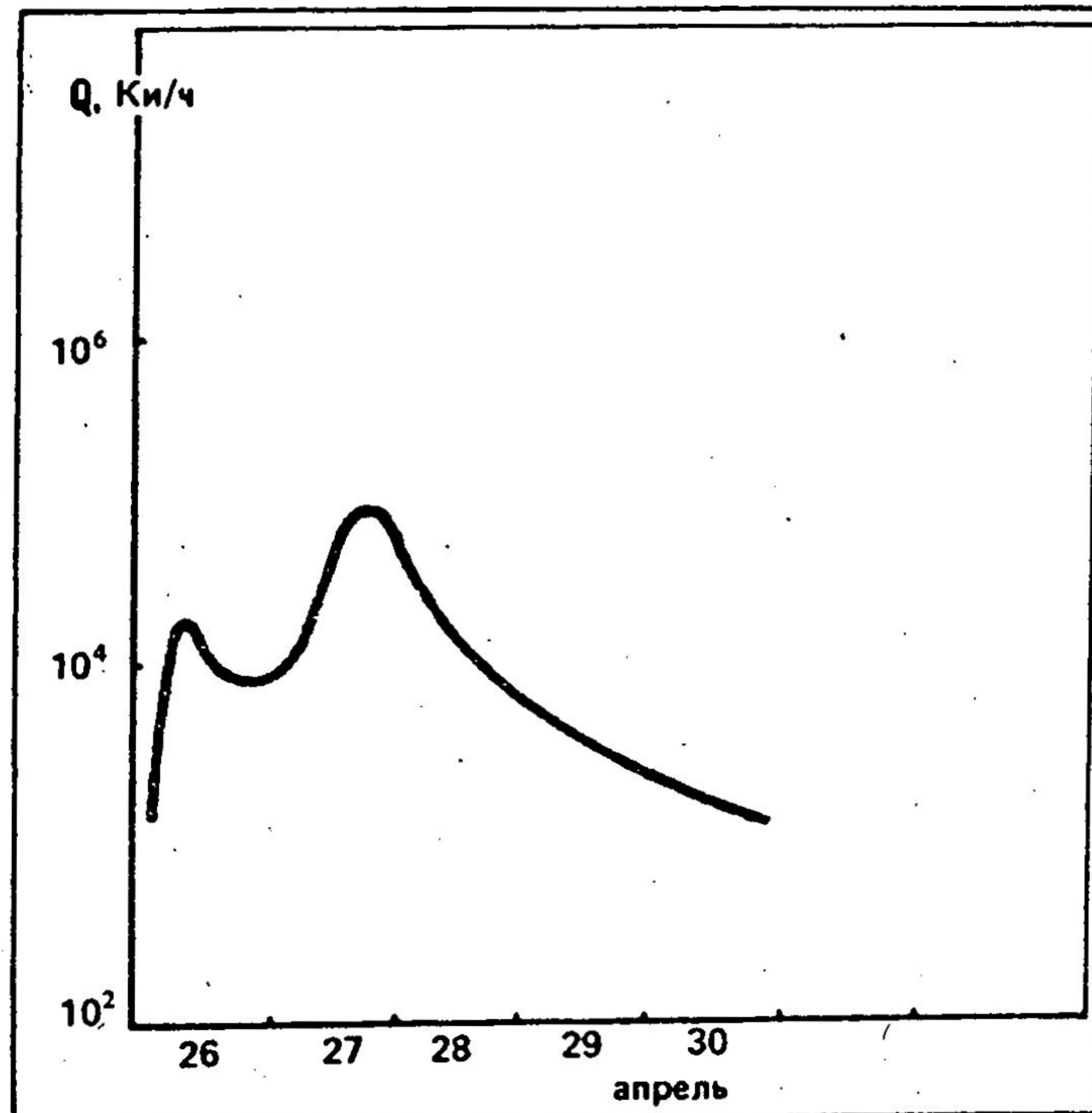


**Распределение долгоживущих радионуклидов по скоростям гравитационного осаждения.** Расчеты показали, что плутоний и стронций распространялись в атмосфере преимущественно на крупных частицах (средняя скорость осаждения около 10 см/с), цезий же — как на крупных, так и на мелких (около 1 см/с).

Как известно, 4 раза в сутки в Гидрометцентре стекаются сведения со всех метеостанций страны и станций аэрологического зондирования. На их базе формируется оперативный банк данных — значений температуры и двух компонент скорости ветра на высотах около 1000, 1500, 2500 м и т. д. в узлах прямоугольной сетки с ячейками 150×150 км. Там же, в Гидрометцентре, после решения задачи прогноза погоды на ближайшие сутки формируется аналогичный банк данных на 24, 36 и 72 час. вперед.

Вся эта информация могла передаваться по каналам компьютерной связи в НПО «Тайфун» и использоваться для диагноза или прогноза. На нее и были ориентированы упомянутые выше модели, которые базировались на решении обычного трехмерного уравнения турбулентной диффузии с использованием разных схем численного решения, зависящих от масштаба переноса. Входящие в уравнение значения скорости ветра и коэффициентов диффузии вычислялись с учетом входной информации по моделям пограничного слоя атмосферы, также зависящим от масштаба переноса.

К моменту аварии модели были вполне работоспособны. Однако отсутствовала оперативная связь с Гидрометцентром, и магнитные ленты с записью текущей информации приходилось возить за 100 км из Москвы в Обнинск, где находится объединение. К то-



**Изменение мощности источника, обусловившее формирование поля загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в дальней зоне.** В частности, при росте выхода этого радионуклида 27 апреля происходил вынос воздушных масс в районы Белоруссии, а также Брянщины и других областей России.

му же модели существовали только в научно-исследовательской версии (т. е. по ходу дела в них вносились разные корректировки), а расчеты велись на ЭВМ ЕС-1061, не удовлетворявшей нас по многим параметрам.

Все это не позволяло решать задачи прогноза. Но самой большой и принципиальной трудностью было отсутствие объективной информации об источнике. Ее не смогли получить прежде всего потому, что не было специальных технических средств, находящихся в постоянной готовности на случай аварии. Удалось провести только отдельные измерения. В частности, с самолета Института прикладной геофизики Госкомгидромета СССР удалось взять пробу воздуха прямо из «факела» — это было 27 апреля, но после этого самолет оказался сильно загрязненным и непригодным к дальнейшей работе. Измерения проводились и специалистами из других организаций (Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, Радиевого института, НПО «Тайфун», военными). Однако все это было уже после 5 мая, когда прекратился активный выброс.

В первые же дни об источнике знали очень мало, например, не было известно, сколько радионуклидов и на какую высоту оказалось заброшено взрывом. Разумеется, информацию о реакторе с первых дней после аварии активно собирали сотрудники Института атомной энергии (ИАЭ) им. И. В. Курча-

това, но их сведения (температура топлива, нейтронные потоки,  $\gamma$ -поля и т. д.) не годились для моделирования атмосферного переноса. Нам, в частности, необходимо было знать, как со временем менялось распределение поступающих из реактора аэрозольных частиц по размеру и радионуклидному составу, а также распределение по высоте различных частиц в факеле.

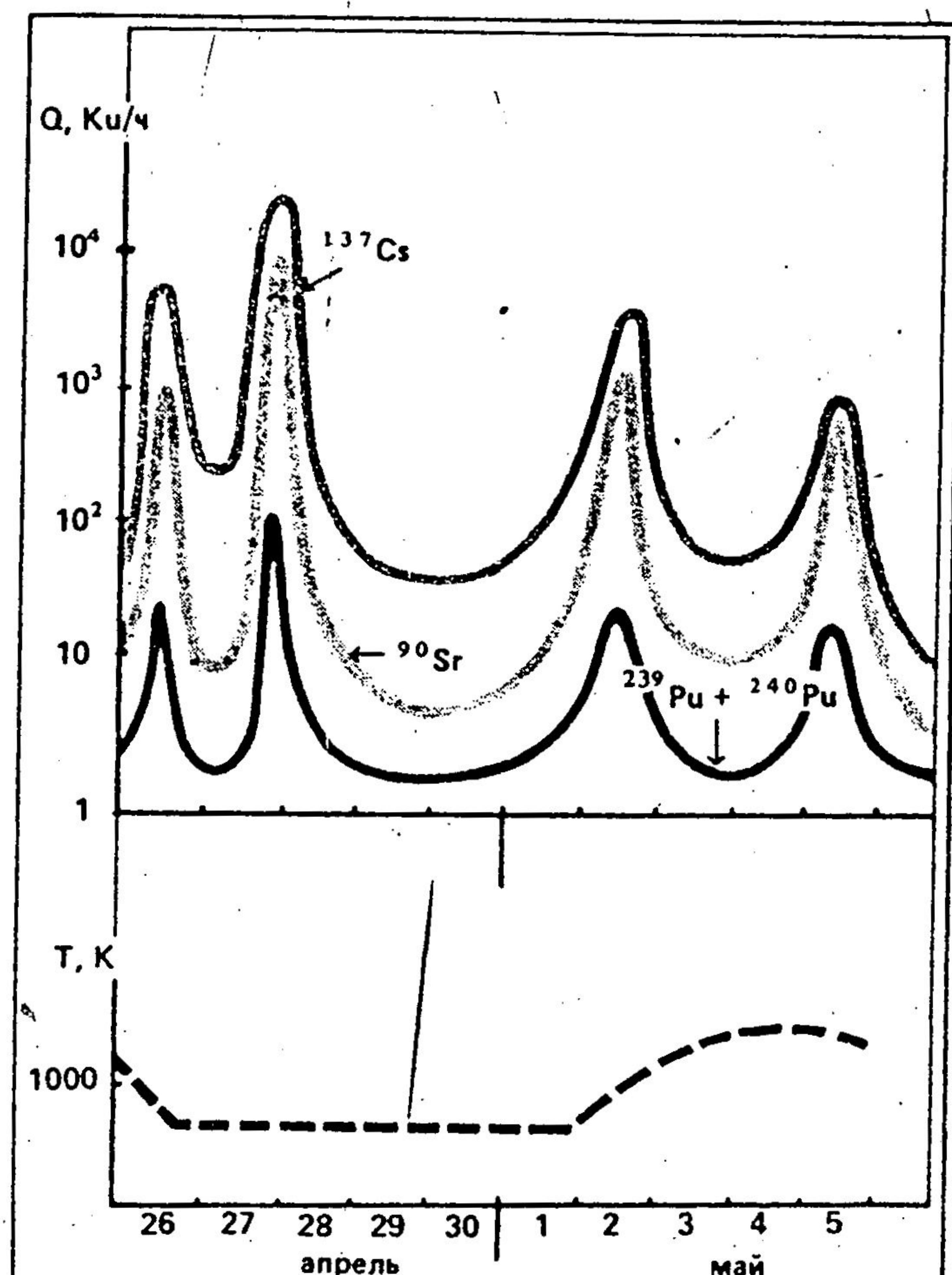
Вообще, отсутствие такого рода информации характерно для аварийных ситуаций, когда трудно провести точные измерения. Поэтому, даже имея специальные технические средства, надо быть готовым к недостаточному знанию характера источника загрязнения и его восстановлению по данным измерительной сети, т. е. к решению обратной задачи.

Упрощенно говоря, мы использовали следующую процедуру. Сначала решили прямую задачу о переносе и осаждении радионуклидов для разных источников (разных распределений аэрозольных частиц по размерам и составу, высоте, мощности выброса и т. д.). Затем из всех решений выбрали те, которые лучше согласовывались с имевшимися замерами выпадений радионуклидов на планшеты или почву. Параметры источника, соответствующие лучшим решениям, принимались за истинные.

Конечно, этот путь из-за некорректности обратных задач может привести к ошибкам, поэтому мы привлекали различные физические соображения и оптимизирующие процедуры. Более того, сама динамика метеорологических процессов во многом способствовала «регуляризации» задачи восстановления источника.

Дело в том, что за время активного выброса (с 26 апреля по 5 мая) произошел разворот ветра на  $360^\circ$ . Это позволило при решении обратной задачи выделить вклады источника в разные моменты времени и проследить динамику выброса день за днем. Расчеты, показывающие основные этапы формирования следа радиоактивных выпадений, проводились для невесомой примеси (тем самым, кстати, моделировалось поведение  $^{131}\text{I}$ ), поступающей мгновенными импульсами произвольной мощности в моменты, характеризующиеся перестройкой метеополей. Такой характер источника, разумеется, не реален и пригоден лишь для качественного анализа.

Из решения обратной задачи были получены характеристики выброса долгоживущих радионуклидов —  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , а также  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  (суммарно). Судя по скоростям осаждения аэрозольных частиц, плутоний и часть цезия переносились на крупных части-



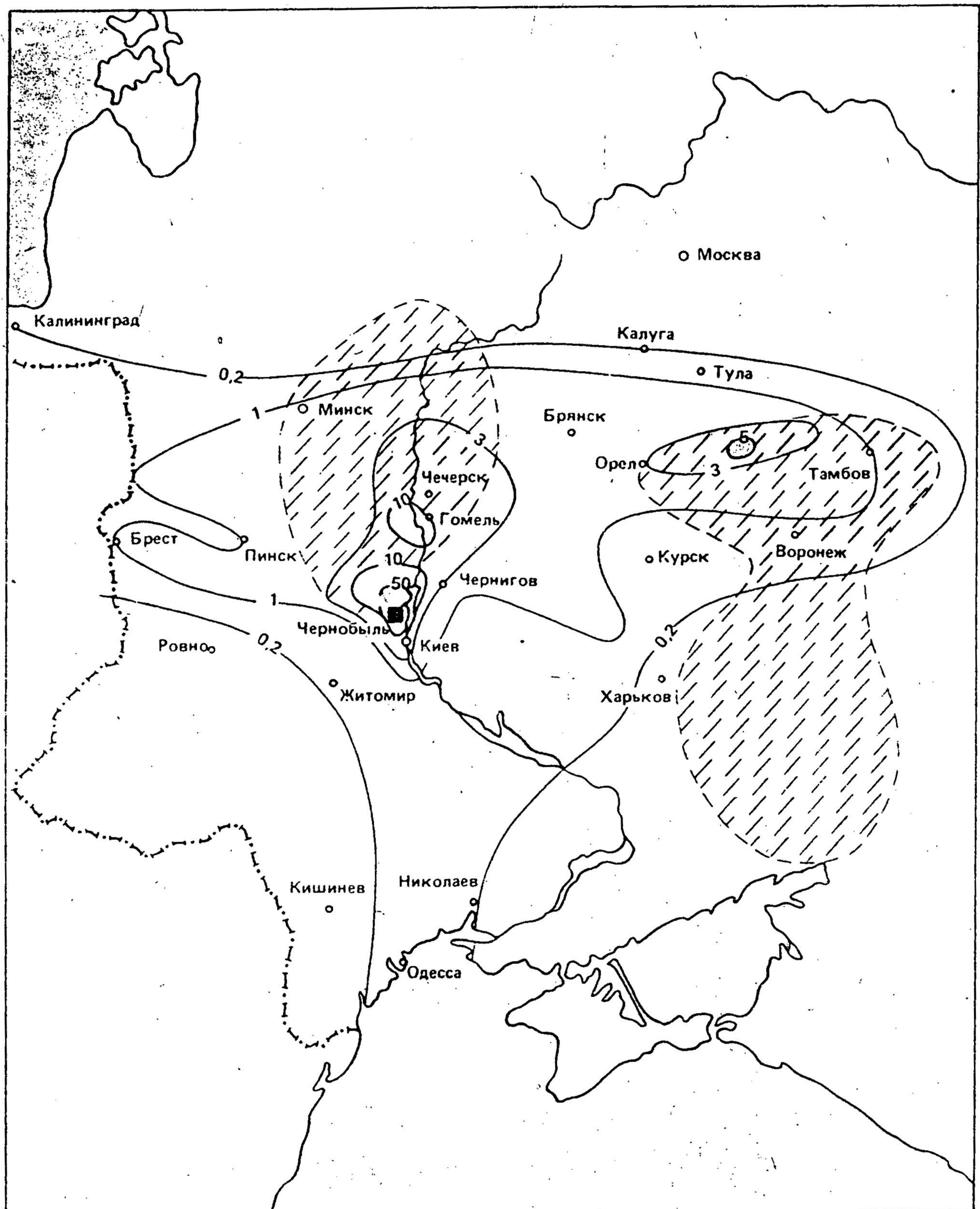
Результаты моделирования изменения мощности источника  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ , переносившихся на крупных частицах и сформировавших поля выпадений в ближней зоне [до 100–200 км от реактора]. Внизу — изменение температуры топлива [по данным ИАЭ].

цах (скорее всего, частицах топлива) и должны были осесть в ближней зоне. Основная же часть цезия переносилась мелкими частицами на значительные расстояния.

Базируясь на анализе метеорологической ситуации и параметрах источника, полученных путем решения обратной задачи, обратимся к формированию загрязнения.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ

Взрыв реактора 26 апреля привел к резкому выбросу и последующему истечению радионуклидов в виде частиц топлива, аэрозольных частиц и газов. В последующие 1,5 сут. они переносились преимущественно в западном, северо-западном направлении, сформировав обширный западный след. В это время температура топлива падала и мощность выброса уменьшалась. С середины дня 27 апреля графит в реакторе стал гореть интенсивнее, и выброс всех радионуклидов — особенно  $^{137}\text{Cs}$ , переносимого газом и частицами аэрозолей, — вырос. В это



Карта выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в дальней зоне по результатам физико-математического моделирования. Хотя эта карта не столь детальна, как полученная позднее официальная карта загрязнения стронцием, но в ней просматриваются черты реального поля распределения радиоактивных следов.

Плотность выпадений  $^{137}\text{Cs}$ , Ки/км $^2$ :

0,2 – 1

1 – 3

3 – 10

> 10

> 50

Область выпадения осадков при прохождении радиоактивного облака

время направление ветра сменилось на северное и затем, очень быстро, на северо-восточное. На траектории этого переноса и произошло осаждение цезия, приведшее к формированию обширных Брянско-Белорусского и Орловско-Тульско-Калужского пятен. Этому способствовали и осадки, выпавшие при прохождении облака.

Второй фактор, сказался на плотности выпадений в районе пятен,— существование здесь обширных застойных зон. Так, у Чернобыля скорость ветра на высоте выброса (около 1000 м) достигала 10 м/с, а в районе пятен, уменьшилась до 1—2 м/с. Это привело к застою масс радиоактивного аэрозоля и наряду с неравномерным выпадением осадков дало эффект разномасштабной пятнистости.

Столь подробное обсуждение этих деталей связано с тем, что природа пятен вызвала много споров. Высказывалось даже предположение, что Брянско-Белорусское пятно — результат специальных работ по осаждению радиоактивного облака с целью не допустить его к Москве. На самом деле пятнистость обусловлена сочетанием метеорологических факторов и особенностей поступления радионуклидов в атмосферу.

Однако вернемся к формированию полей загрязнений. 27 апреля началась засыпка реактора, и 28—30 апреля интенсивность и высота выброса существенно уменьшились. В это время продолжался «разворот» ветра по часовой стрелке с востока на юг, поэтому территории к юго-востоку от реактора оказались относительно чистыми. Со 2 мая, когда в реакторе начался разогрев, связанный с уменьшением теплоотвода, аэрозольные частицы периодически прорывались в атмосферу (максимумы 4 и 5 мая). Во время этих выбросов преобладал северный ветер, что привело к формированию южного следа.

Так мы оцениваем ситуацию первых дней после аварии сегодня. А теперь обратимся для сравнения к расчетной карте выпадений  $^{137}\text{Cs}$  в дальней зоне. Эта карта, полученная путем физико-математического моделирования, отражает всю совокупность физических процессов, о которых говорилось выше. Разумеется, она не столь полна, как более поздние<sup>1</sup>, но в ней уже просматриваются черты реального поля радиоактивного загрязнения: западный, северо-западный и южный следы, а также три крупных пятна

(центральное — Чернобыльское, в Белоруссии и России).

Самое же главное — эта карта была получена в середине мая 1986 г., когда почти все силы оказались сосредоточены в 30-километровой зоне и близ нее и только отдельные измерения в пунктах контроля Госкомгидромета говорили о возможном неблагополучии в отдаленных районах. Тогда же, в середине мая, НПО «Тайфун» организовало экспедицию для отбора почвенных проб по линии Брянск—Гомель—Барановичи. Их анализ положил начало детальному обследованию обширного Брянско-Белорусского пятна, продолжающемуся и по сей день.

Примерно в это же время начались работы по обследованию цезиевого загрязнения в Орловско-Тульско-Калужском пятне. Иными словами, расчетную карту загрязнений мы получили в то время, когда в ней была практическая потребность и когда она могла скорректировать средства контроля. Это вполне конкретный пример решения задачи диагноза аварийной ситуации методами физико-математического моделирования в реальном масштабе времени.

Разные оценки суммарного выхода радионуклидов, полученные как в результате физико-математического моделирования, так и интегрирования (т. е. подсчета выпадений на подстилающую поверхность), дают в целом согласующиеся значения. Лишь в отдельных случаях расхождение достигает 100 %, что при общем недостатке данных и отсутствии информации об источнике представляется вполне разумной точностью.

И еще один важный момент. При подсчете абсолютного значения выхода радионуклидов важно принимать во внимание данные не только по территории нашей страны, но и по другим странам. За рубежом моделированием переноса и осаждения радионуклидов после Чернобыльской аварии занимались многие исследователи, но наиболее полно, на наш взгляд, важнейшие процессы учтены в работах групп Х. Эпсаймон из Лондонского Империал-колледжа (Великобритания) и Н. Гудиксена из Ливерморской лаборатории (США). В этих работах упор делается на описание загрязнений в Западной Европе и масштабах земного шара соответственно. Их методы и подходы в общем сходны с нашими. В частности, как и мы, они решали обратную задачу, но используя данные о загрязнении вне территории нашей страны.

После сопоставления результатов моделирования при разных масштабах выяснилось, что, восстанавливая источник, мы допустили ряд ошибок. Например, моделирова-

<sup>1</sup> Речь идет о картах загрязнения территории Европейской части страны долгоживущими радионуклидами  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ , составленных в Госкомгидромете СССР (см., например: Израэль Ю. А. // Наука и жизнь. 1990. № 9, С. 28—29).



**Саркофаг над 4-м блоком ЧАЭС.**

ние для Западной Европы показало, что дальнейший перенос  $^{137}\text{Cs}$  осуществлялся не только мелкими частицами, но и газом и что на эту фазу, обусловившую загрязнение Западной Европы, приходится около 1 МКи, т. е. столько же, сколько выпало на территории нашей страны с аэрозольными частицами. Моделирование же переноса в масштабах земного шара позволило выяснить, что первым взрывом значительное количество радионуклидов было выброшено на высоту около 10 км. Это облако сначала распространилось на юг, а затем обогнуло половину земного шара и даже вызвало небольшое повышение уровня радиоактивности в США.

Полностью все данные об источнике были согласованы в конце 1989 г. на Первой Международной рабочей группе по тяжелым авариям и их последствиям, созданной по инициативе Ядерных обществ СССР и США. Там обсуждались процессы в реакторе, а также баланс радиоактивности и радиоактив-

ных выпадений: сколько накопилось в реакторе до аварии, осталось в нем и под ним после аварии, выпало на промплощадке, вдали от станции и в целом на территории Европы и по всему земному шару<sup>2</sup>.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ПОЧВ

Следующий этап наших работ по моделированию переноса и осаждения «чернобыльских» радионуклидов был связан с вторичным загрязнением почв и водных объектов. Последняя проблема оказалась для Чернобыльской аварии особенно острой, поскольку и в 30-километровой зоне, и в районе Брянско-Белорусского пятна имеется разветвленная сеть рек — это водосборы Припяти и Днепра, которые питают 40 млн. чел., проживающих ниже по Днепровскому каскаду.

Столь же актуальной была проблема смыва радионуклидов с водосборов. Неда-

<sup>2</sup> Подробнее см.: Четыре года после взрыва // Природа. 1990. № 11. С. 64—90.

ром с первых дней после аварии приступили к обвалованию берегов для защиты от возможного дождевого смыва.

Важно было уяснить, что можно ожидать при сильных летних дождях и интенсивном весеннем снеготаянии. Обсуждались самые разные оценки: от достаточно оптимистичных, основанных на наблюдениях за глобальными выпадениями продуктов ядерных взрывов и не предвещавших существенного смыва, до крайне пессимистичных, предрекавших, например, что весь стронций будет смыт с поймы Припяти в Киевское водохранилище.

От того, как будут разворачиваться эти события, зависела стратегия водоохранных мероприятий. В частности, предлагались переброска вод Припяти в Днепр в обход 30-километровой зоны или возведение плотины в устье Припяти, чтобы «запереть» там всю радиоактивность. Это, конечно, крайние меры. Во-первых, чрезвычайно дорогие и, во-вторых, в довершение к радиоактивному загрязнению они погубили бы всю 30-километровую зону. Идти на это можно было только при полной безысходности.

Поэтому НПО «Тайфун» должен был дать прогноз вторичного загрязнения радионуклидами этой зоны при самых неблагоприятных метеоусловиях: обильных дождях, снеготаянии и пр. Поскольку с самого начала было ясно, что Чернобыльский выброс уникален и на его изучение уйдут месяцы или даже годы, а прогноз требовался «сегодня», главным стала формулировка математической модели, которая достаточно адекватно описывала бы поведение радионуклидов в зоне.

Наша модель основывалась на классических представлениях о том, что радионуклиды могут находиться в растворенном, обменно-сорбированном и необратимо сорбированном состояниях, а также входить в состав нерастворимых частиц топлива. Эти четыре фазы и нужно было учесть, чтобы корректно описать их вертикальное перемещение по профилю, поверхностный смыв в растворенном состоянии и с частицами почвы, а также перенос по рекам.

Сформулировав системы уравнений, описывающих эти процессы, мы убедились, что всем «управляют» три параметра: содержание обменных форм радионуклидов, содержание топливных частиц и коэффициенты распределения (содержания обменных форм) для систем «вода — почва», «вода — донные отложения» и «вода — взвесь». Их-то и предстояло измерить.

По всей 30-километровой зоне были отобраны пробы, в которых затем в лабо-

раториях НПО «Тайфун» исследовались формы нахождения радионуклидов и измерялись коэффициенты распределения.

Итак, на первом этапе мы получили параметры модели. После этого (а скорее, одновременно) мы вышли в поле и на разных расстояниях от реактора подготовили несколько площадок для натурных экспериментов. Лето было засушливым, и мы «дождевали» площадки из брандспойта пожарной машины. Предварительно измеряли содержание радионуклидов на площадке и отбирали пробы для определения в лабораторных условиях форм нахождения радионуклидов. Определив полный гидрологический режим при таком искусственном обводнении, мы брали пробы в стоке, что позволяло определить коэффициент смыва.

В идеале эксперимент нужно было бы выполнить примерно на сотне площадок. Получить коэффициенты смыва, заложить их в модель и описать, как все стечет по рекам. Но из-за тяжелой обстановки (высокая активность, жара, плохая организация и т. д.) мы смогли провести лишь серию из десятка экспериментов в трех точках. Это позволило проверить модель. И когда мы убедились, что она работает, отпала нужда в экспериментах по всей зоне. Мы только измерили те параметры, которые необходимо было заложить в модель, облетев территорию на вертолетах и отбрав пробы.

Таким образом, первая часть задачи была решена: мы смоделировали, как радионуклиды при выпадении дождя или таянии снега попадают в глубь почвы и смываются поверхностным стоком в реки. При этом мы, естественно, проверяли модель в лабораторных экспериментах, заложив несколько колоночных опытов и выяснив, как идет вертикальное распределение.

Разобравшись с этим, нужно было отработать модель поведения радионуклидов в реке, где своя специфика, свои калибровочные параметры и т. д. В ту пору мы не могли измерить все необходимые параметры для рек и сделали одно простое допущение, посчитав, что значения коэффициентов распределения и содержания обменных форм в реке такие же, как и на берегу. Конечно, это натяжка, но нам пришлось на это пойти.

Итак, требовалось откалибровать два важных физических параметра: коэффициенты обмена растворенными радионуклидами между дном и водой и на взвесях. У нас работала сеть контроля концентрации радионуклидов в устьях (на взвесях и в растворенном виде). Сопоставляя результаты этих наблюдений и модельных расчетов, мы уста-

новили искомые параметры, т. е. подготовили прогноз.

Вся территория была у нас разбита на 37 водосборов. Каждый из них мы охарактеризовали несколькими параметрами — коэффициентами распределения, содержанием обменных форм и топливных частиц — и для каждого дали гидрологический прогноз: сколько воды просочится и сколько уйдет с поверхностным стоком, а также сколько почвы будет смыто. В модель закладывались и характеристики рек. И все это мы просчитали для разных метеорологических сценариев.

Полученные результаты свидетельствовали, что угрожающего положения нет — это справедливо и для стронция, и для цезия. Впрочем, это стало ясно, как только мы увидели, в каких формах находятся эти элементы. Дело в том, что примерно 10—25 % стронция оказалось в почвах в обменной форме. В глобальных же выпадениях до 75 % стронция находилось в растворимой форме, и там коэффициенты смыва не превышали 1 %. Следовательно, и здесь не должны были бы появиться более высокие значения. Правда, в данном случае имелась специфика, связанная с затоплением поймы: возможно, из-за застоя воды в пойме стронций успеет раствориться и весь смоется.

Чтобы понять, насколько это предположение справедливо, мы просчитали все для условий поймы (убедившись предварительно, что модель здесь работает) и увидели, что катастрофических величин в этом случае также не должно быть. После этого было решено не проектировать обводной канал, прекратить строительство и дальнейшую разработку малых плотин.

Все с тревогой ждали первой весны. Был подготовлен хороший прогноз Ленинградского государственного гидрологического института, на котором базировались и наши работы. Мы еще раз уточнили наши результаты, проанализировав несколько возможных сценариев снеготаяния. Надо было понять, что «выгоднее» — быстрое или медленное таяние снега, чтобы, исходя из этого, дать рекомендации по снегозадержанию, усилиению тех или иных плотин и т. п. Во время паводка 1987 г. мы организовали систему контроля на всех малых реках, чтобы следить за развитием событий, а также чтобы проверить, насколько наша модель соответствует реальности.

Получилось неплохое согласие — максимальное расхождение в 2—3 раза. Нам удалось отследить и прохождение пика паводка, и «взмучивание» радионуклидов (точнее, удержание их на взвесях). Но на этом

наши работы не кончились. Оставался открытый такой важный вопрос, как трансформация форм. Ведь в первых прогнозах мы рассматривали короткий отрезок времени, и тогда этот вопрос нас мало волновал. Переходя же к долговременному прогнозу, мы предполагали неуклонное снижение коэффициентов смыва и поступления радионуклидов в реки в связи с «заглублением» их обменных форм. Мы рассчитывали, что ежегодно поступление радионуклидов в реки будет уменьшаться почти в 1,5 раза. К сожалению, это не подтвердилось — все держится примерно на одном уровне.

Скорее всего это вызвано изменением форм нахождения радионуклидов из-за разрушения топливных частиц и поступлением стронция в растворимой форме. Это, конечно, гипотеза. Специалистам еще предстоит разобраться с топливными частицами, чтобы понять, насколько интенсивно поступает стронций в обменной форме в окружающую среду. Не могут ли нас ждать здесь какие-то сюрпризы? И все же думается, что сейчас главное — изучить трансформацию форм и получить надежные сведения о проникновении радионуклидов в подземную гидросферу.

## РОЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

В заключение хотелось бы высказать несколько общих соображений о роли физико-математического моделирования в аварийных ситуациях. При любой крупной аварии одна из первоочередных задач — снизить отрицательное воздействие загрязнения на здоровье людей и окружающую среду. Для этого необходимо как можно быстрее оценить масштабы загрязнения, определить, откуда людей нужно немедленно эвакуировать, а где, на какой-то срок можно ограничиться полумерами (привозные продукты питания, дезактивация почв, переход на другие источники водоснабжения и т. д.). Причем, важно не только понять сложившуюся ситуацию, но и предсказать, как десятки и сотни факторов (ветер, дождь, движение грунтовых вод, химические превращения и др.) скажутся на концентрации загрязняющих веществ в будущем. Очевидно, математическое моделирование их поведения в окружающей среде — единственное средство для построения подобных прогнозов.

Менее очевидно, что математическое моделирование применимо для оценки текущего состояния окружающей среды. Казалось бы, эту задачу можно решать, непосредственно измеряя концентрации за-

грязняющих веществ в пробах воздуха, почвы, воды, биологических объектов и т. д. Однако здесь очень важен временной фактор: при огромных масштабах загрязнения, как в случае Чернобыльской аварии, или когда анализы проб очень трудоемки (например, при загрязнении диоксином), потеря времени на построение карт загрязнений инструментальными методами неизбежна. И здесь, безусловно, поможет математическое моделирование. Более того, его результаты будут способствовать оптимизации работы измерительной системы, поскольку пробы можно будет отобрать в первую очередь в тех районах, где, по расчетам, уровни загрязнения особенно высоки.

И вообще, нельзя противопоставлять традиционные измерения и физико-математическое моделирование: расчеты должны направлять и координировать работу средств контроля за загрязнением, результаты измерений — использоваться для корректировки расчетов и т. д. Только при таком подходе математическое моделирование может справиться с новой для него ролью — способствовать принятию оперативных решений при аварийном загрязнении.

Чтобы выполнить эту роль, математические модели должны не только адекватно описывать основные процессы, но и делать это в реальном масштабе времени, т. е. тогда, когда в результатах расчетов еще есть надобность. Если говорить о Чернобыле, — это минуты и часы для предупреждения жителей г. Припяти, часы и сутки — для предупреждения жителей удаленных районов, несколько суток — для оценки общей картины загрязнения местности, недели и месяцы — для оценки вторичных эффектов (ветровой подъем или смыв радионуклидов) и т. д.

Разумеется, для каждого из этих масштабов нужны свои модели, описывающие различные процессы с соответствующей детальностью, но все они требуют, чтобы входные данные и параметры были получены

своевременно. Это означает, что должна существовать соответствующая технология сбора, передачи, хранения, обработки и представления информации, а также программные средства взаимодействия моделей с информацией. Но и этого мало, поскольку в ряде случаев невозможно предугадать, какое загрязняющее вещество будет выброшено в результате аварии. Следовательно, необходимы методы быстрой оценки параметров модели (скоростей поглощения загрязняющих веществ в почве, их трансформации, миграции и т. д.) как функций физико-химических свойств и параметров окружающей среды. Такая оценка может потребовать специальных лабораторных и полевых экспериментов.

Таким образом, для оперативного анализа и прогноза любого аварийного загрязнения требуются:

набор математических моделей поведения загрязняющих веществ в почве, воде и воздухе для разных пространственных и временных масштабов;

компьютерные линии связи и оперативные банки хранения текущей метеорологической и гидрологической информации, а также данных о загрязнении разных объектов окружающей среды;

банки данных режимной информации об окружающей среде (географические карты разного масштаба, характеристики водохранилищ, рек, рельефа, ландшафтов, почв и т. д.);

банки данных о физико-химических свойствах загрязняющих веществ;

пакет программ информационной поддержки;

группы лабораторного и полевого эксперимента.

К сожалению, и через пять лет после Чернобыльской аварии в нашей стране имеются только отдельные элементы такого комплекса, принадлежащие, к тому же, разным ведомствам.