

УДК 556.383 : 556.388

В. М. Шестопалов, А. С. Богуславский, В. Н. Бублясь, В. В. Гудзенко
И. П. Онищенко, Ю. Ф. Руденко

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ г. КИЕВА

В работе приведены данные натурных наблюдений и результаты моделирования загрязнения геологической среды подземных вод долгоживущими радионуклидами (^{137}Cs и ^{90}Sr) чернобыльского происхождения в пределах основных водозаборов Киевской городской агломерации, служащих для питьевого водоснабжения. Полученные данные позволяют предположить возможность аккумуляции в геологической среде верхнего участка зоны активного водообмена с нисходящим инфильтрационным питанием значительной части исходных поверхностных радиоактивных выпадений, что подтверждает существование аномально быстрых путей вертикальной миграции загрязнений с поверхности в водоносные горизонты, и с другой стороны, свидетельствует о важной роли геологической среды пород как мощного защитного барьера геосферы. Дальнейшее изучение характера и путей радиоактивного загрязнения подземных вод требует более достоверной информации о концентрациях радионуклидов в подземных водах и породах, детального районирования исследуемой территории по зонам восходящей и нисходящей миграции на основе данных моделирования гидродинамического режима и организации гидрогеологического мониторинга.

Согласно положениям классической гидрогеологии, подземные воды глубоких водоносных горизонтов считались ранее надежно защищенными от проникновения поверхностных загрязнений благодаря высокой сорбционной способности почв и грунтов зоны аэрации, наличию регионально залегающих слабопроницаемых отложений, а также большой продолжительности периода формирования подземных вод.

© В. М. ШЕСТОПАЛОВ, А. С. БОГУСЛАВСКИЙ, В. Н. БУБЛЯСЬ, В. В. ГУДЗЕНКО,
И. П. ОНИЩЕНКО, Ю. Ф. РУДЕНКО, 1996

Однако после ряда широкомасштабных техногенных загрязнений, наибольшим из которых явилось радиоактивное загрязнение территории после Чернобыльской аварии, результаты массовых определений новейших загрязнителей в подземных водах привели к выводу об аномально быстром их проникновении даже в глубокие водоносные горизонты. Так, в подземных водах с расчетным возрастом в несколько сотен лет были обнаружены пестициды, которые применялись в сельском хозяйстве в 1970—1980-е годы, а также радионуклиды, чернoбыльское происхождение которых не вызывает сомнения.

Загрязнение подземных вод верхнего водоносного горизонта и части артезианских горизонтов особенно велико в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, которая характеризуется высокой плотностью поверхностного загрязнения радионуклидами.

В то же время существенное загрязнение подземных вод было также обнаружено на периферии территории, подвергшейся чернoбыльским радиоактивным выпадениям, включая ряд скважин, используемых для питьевого водоснабжения. Указанный факт вызвал необходимость более интенсивных исследований и прогнозирования процессов миграции радиоактивных загрязнений в подземных водах.

Исследование возможных путей миграции

В ходе анализа механизмов переноса радиоактивных загрязнителей в подземные воды наряду с известными инфильтрационными путями были обнаружены также два «нетрадиционных» пути миграции, которые в значительной степени обходят природный сорбционный барьер подземной гидросферы.

Первый из этих путей имеет техногенный характер и обусловлен несовершенством конструкции водозаборных скважин или низким качеством их обсадки. При работе высокодебитных погружных насосов в прискважинном пространстве водоносного горизонта формируется воронка депрессии, характеризующаяся перепадами напора в десятки метров. Вследствие этого вода движется из верхних горизонтов в нижележащие по разуплотнениям, трещинам и пустотам вдоль ствола скважины.

Возможность такого пути быстрого проникновения загрязнителей в глубокие водоносные горизонты была доказана экспериментально на скважинах Киевского водозабора. В этих экспериментах в грунтовый водоносный горизонт вводили индикатор NaCl на расстоянии нескольких десятков метров от высокодебитной скважины, эксплуатирующей водоносный горизонт на глубине 250 м. Увеличение содержания ионов хлора в откачиваемой воде наблюдалось спустя всего несколько дней после введения индикатора, что доказывает возможность быстрого проникновения загрязнителя в глубоко залегающие водоносные горизонты, минуя естественные барьеры сорбции, по затрубному пространству скважин.

Другой путь аномально быстрой миграции связан с зонами нарушений в земной коре. В отличие от обычных зон, при образовании трещин в кристаллических породах и карстующихся известняках, обнаружение неоднородностей проницаемости в нефациальных разуплотненных отложениях является разработкой, впервые выполненной гидрогеологами Научно-инженерного центра радиогидрогеоэкологических полигонных исследований при Президиуме НАН Украины (НИЦ РПИ НАНУ).

В качестве первоочередных объектов для исследования возможного быстрого переноса влаги и загрязнителей через зону аэрации в подземные воды были выбраны тектонически активные зоны и морфоскульптуры понижений. Их изучение включало широкомасштабное дешифрирование аэрофотоснимков и топографических карт, эманационное профилирование предполагаемых активных зон и окружающих фоновых территорий, детальный анализ физико-механических, водно-физических, химических, электрических и других свойств почвогрунтов; осуществление режимных наблюдений

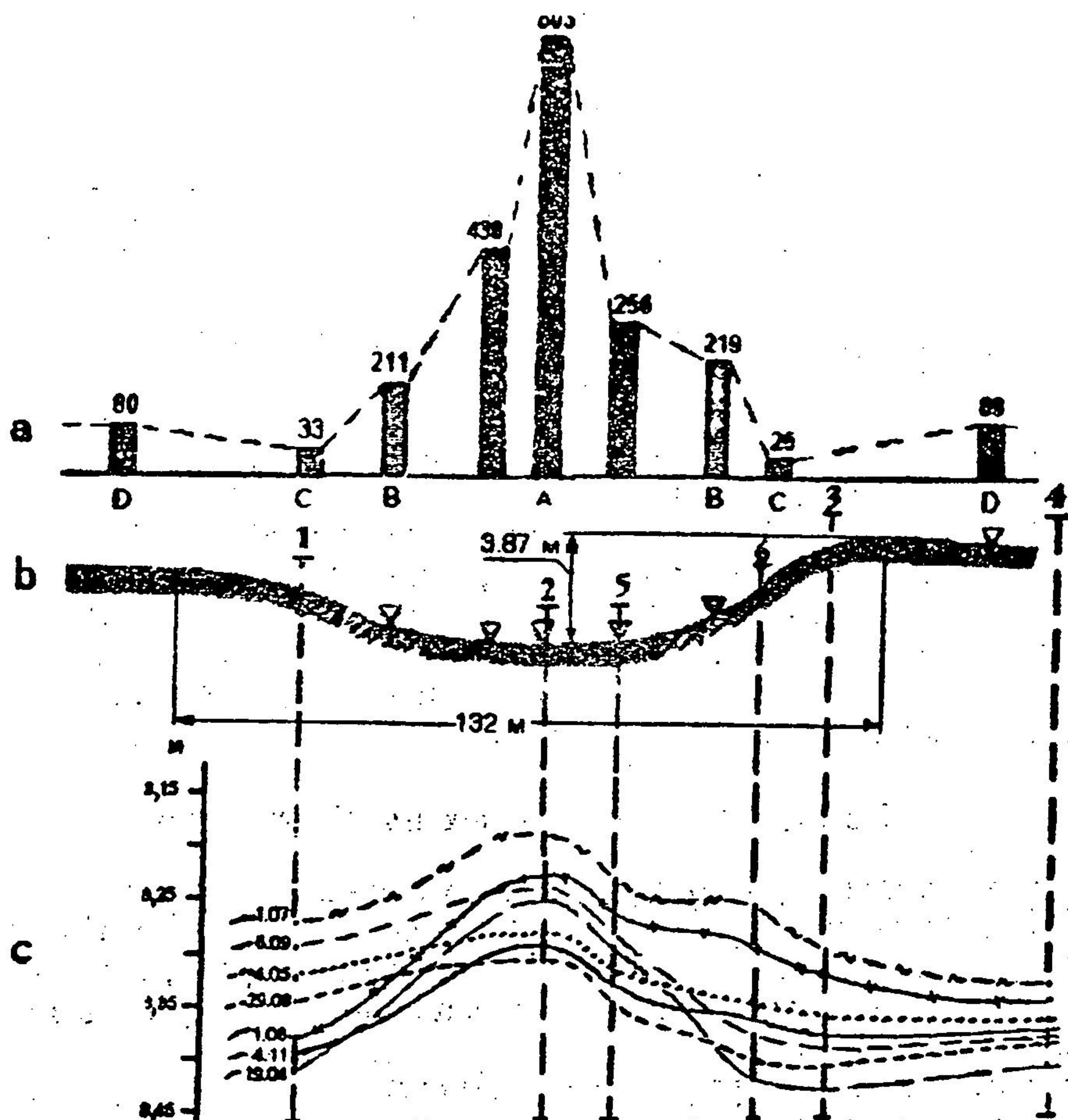


Рис. 1. Схема инфильтрационного питания и изменения уровней в верхнем водоносном горизонте; а — интенсивность инфильтрации в верхнем горизонте согласно гидрофизическим данным (в миллиметрах); б — профиль поверхности зоны понижения; ∇ — гидрофизические наблюдательные площадки; 1 — 6 — номера скважин; с — изменение уровня подземных вод во времени; 1.07 — дата замера (число, месяц в 1995); зоны: А — центральная активная, В — переходная, С — склон, D — фоновая

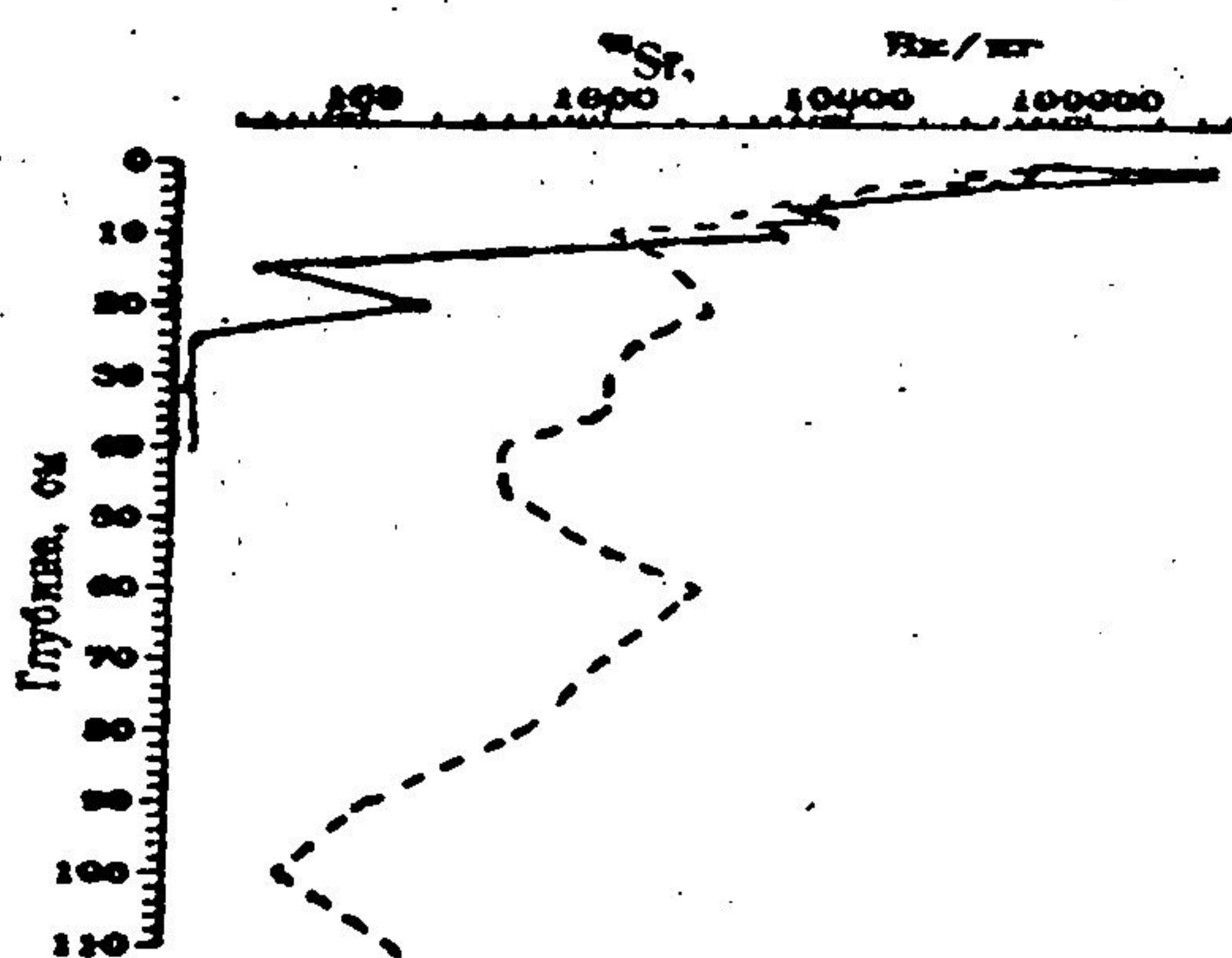


Рис. 2.

Рис. 2. Содержание ^{90}Sr в почвенных разрезах профиля первого урочища Вересок: — — — — — борт и — — — — — дно лощины

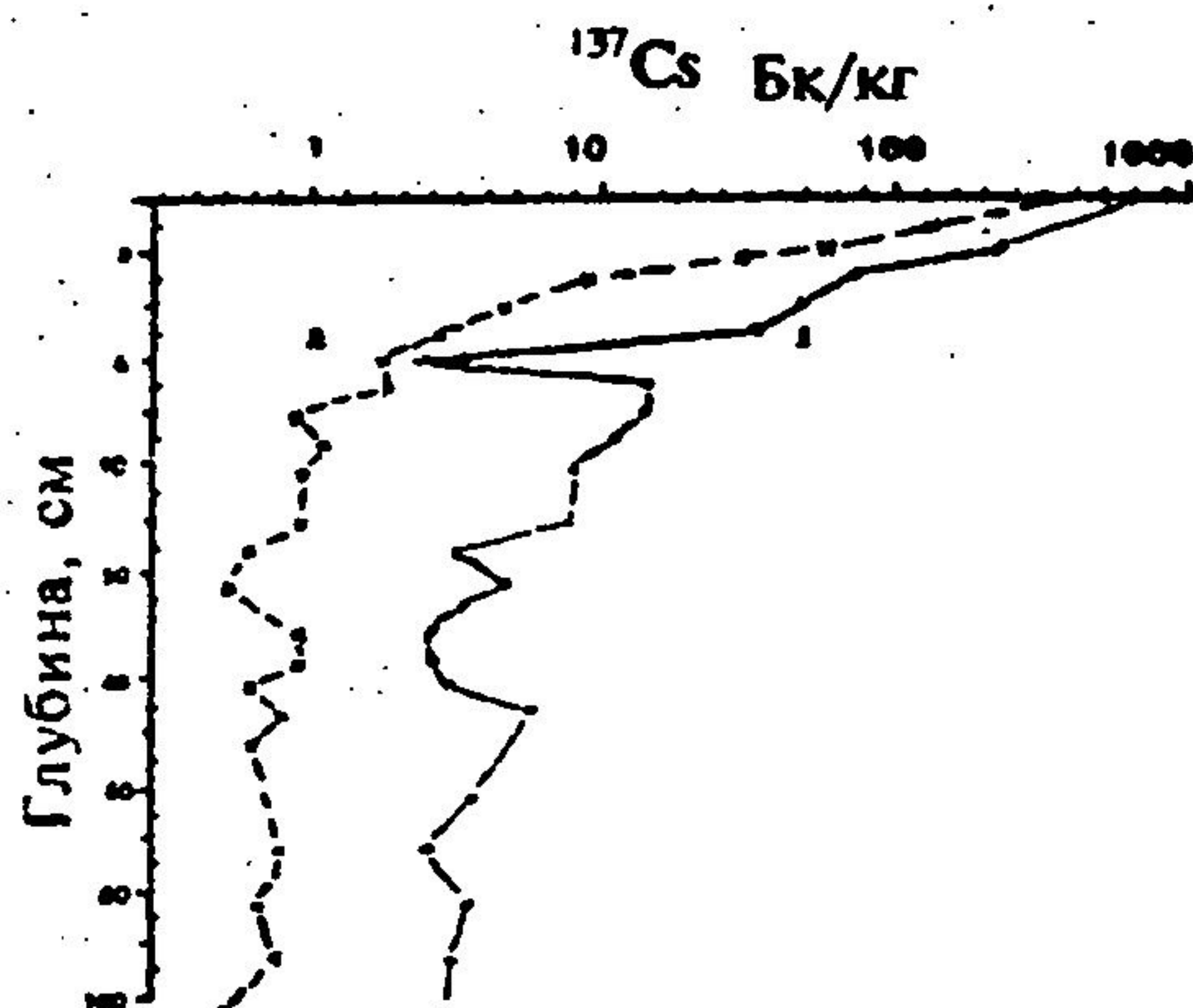


Рис. 3.

Рис. 3. Распределение концентрации ^{137}Cs (Бк/кг) по глубине для отложений на фоновой площадке Лютежского полигона: 1 — профиль в пределах понижений; 2 — фоновый участок

влагопереноса в зоне аэрации, уровней подземных вод и их химического состава.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что гранулярные коллекторы в разуплотненных породах характеризуются существенной неоднородностью фильтрационных и миграционных параметров. Зоны аномально быстрой миграции расположены в пределах круговых и линейных понижений ландшафта, характеризующихся высокой эманационной способностью разуплотненных отложений, их повышенной влагопроницаемостью и электрической проводимостью. Почвенный разрез в этих зонах отличается от таковых на фоновых участках; уровни подземных вод динамически реагируют на атмосферные осадки, о чем свидетельствует аномально высокое инфильтрационное питание и формирование растекающихся куполов уровня подземных вод после периода интенсивных осадков (рис. 1). Анализ содержания радионуклидов в твердой фазе в профилях почвогрунта свидетельствует о более интенсивной вертикальной миграции в активных зонах (рис. 2, 3) [1].

Моделирование миграции радионуклидов в подземных водах

Наряду с экспериментальными и натурными исследованиями нами было выполнено математическое моделирование процессов миграции на основе данных геологического разреза, фильтрационных и сорбционных параметров водоносных горизонтов, начальных плотностей поверхностного загрязнения радионуклидами и наблюдаемых в настоящее время их концентраций в различных водоносных горизонтах. Моделирование выполнялось с использованием оригинальных программ, позволяющих получить согласованные прогнозные и эпигнозные решения для вертикальных профилей концентрации радионуклидов в геологической среде подземных вод.

Начиная с 1991 г. выполняли исследования по оценке и прогнозированию загрязнений подземных вод радионуклидами черномыльского происхождения в пределах территории Киевской городской агломерации и зоны отчуждения ЧАЭС [2, 3]. В вертикальном разрезе изучали 4 водоносных горизонта, включая четвертичный (глубина до 20 м), эоценовый (глубина до 130 м), сеноман-келловейский (глубина до 200 м) и байосский (глубина до 250—300 м). Во всех этих горизонтах наблюдалось загрязнение подземных вод ^{137}Cs с концентрациями в пределах от 10^{-12} до 10^{-11} Ки/дм³ (0,037—0,37 Бк/дм³).

Для получения модельных оценок загрязнения подземных вод и пород ^{137}Cs в пределах Киевской городской агломерации и зоне отчуждения ЧАЭС проведено моделирование вертикального одномерного конвективно-дисперсионного переноса загрязнителя для типичных профилей указанных районов с нисходящим инфильтрационным потоком интенсивности порядка 100 мм/год с учетом равновесной сорбции. Для обоих районов типовые модельные профили были калиброваны по данным наблюдений за концентрацией радионуклида в жидкой и твердой фазах на различных глубинах. Согласно этим данным, в зоне отчуждения ЧАЭС концентрация ^{137}Cs в твердой фазе в верхнем 15-метровом слое имеет значения $(1-10) \cdot 10^{-9}$ Ки/дм³, а в жидкой фазе — изменяется в пределах $10^{-10}-5 \cdot 10^{-9}$ Ки/дм³, оставаясь в нижней части профиля (на глубине 60—100 м) в пределах $10^{-12}-10^{-11}$ Ки/дм³. Исходя из этих значений, были оценены значения коэффициента распределения K_d и получены прогнозные вертикальные распределения концентраций ^{137}Cs до 2050 г.

Для выяснения общей гидродинамической картины потоков фильтрации и выбора представительных вертикальных профилей, а также для уточнения исходных данных по вертикальной компоненте скорости фильтрации, принимались во внимание результаты моделирования геофильтрации на четырехслойной конечно-разностной модели, на которой в НИЦ РПИ с 1990 г. осуществляется модельный мониторинг гидродинамического режима подземных вод в пределах территории Киевской городской агломерации.

Результаты для концентраций в подземных водах в районе г. Киева, представленные в виде вертикальных по глубине профилей прогнозной концентрации на 2000-, 2010-, 2020-, 2030- и 2050-е годы, приведены на рис. 4. На рис. 5 показано изменение во времени суммарного содержания ^{137}Cs в твердой фазе для верхнего метрового слоя почвы в обменной (сорбированной) и нерастворимой формах (кривая 2) и сорбированной формы для нижележащего слоя 1—100 м (кривая 1) в пересчете в эквивалентную поверхностную плотность загрязнения ($\text{Ки}/\text{км}^2$) для района г. Киева. Сумма обменной и нерастворимой форм во всем слое 0—100 м показана на рис. 5, 3.

Выводы. Анализ полученных прогнозных решений для вертикальных распределений концентрации ^{137}Cs для рассмотренных районов позволяет

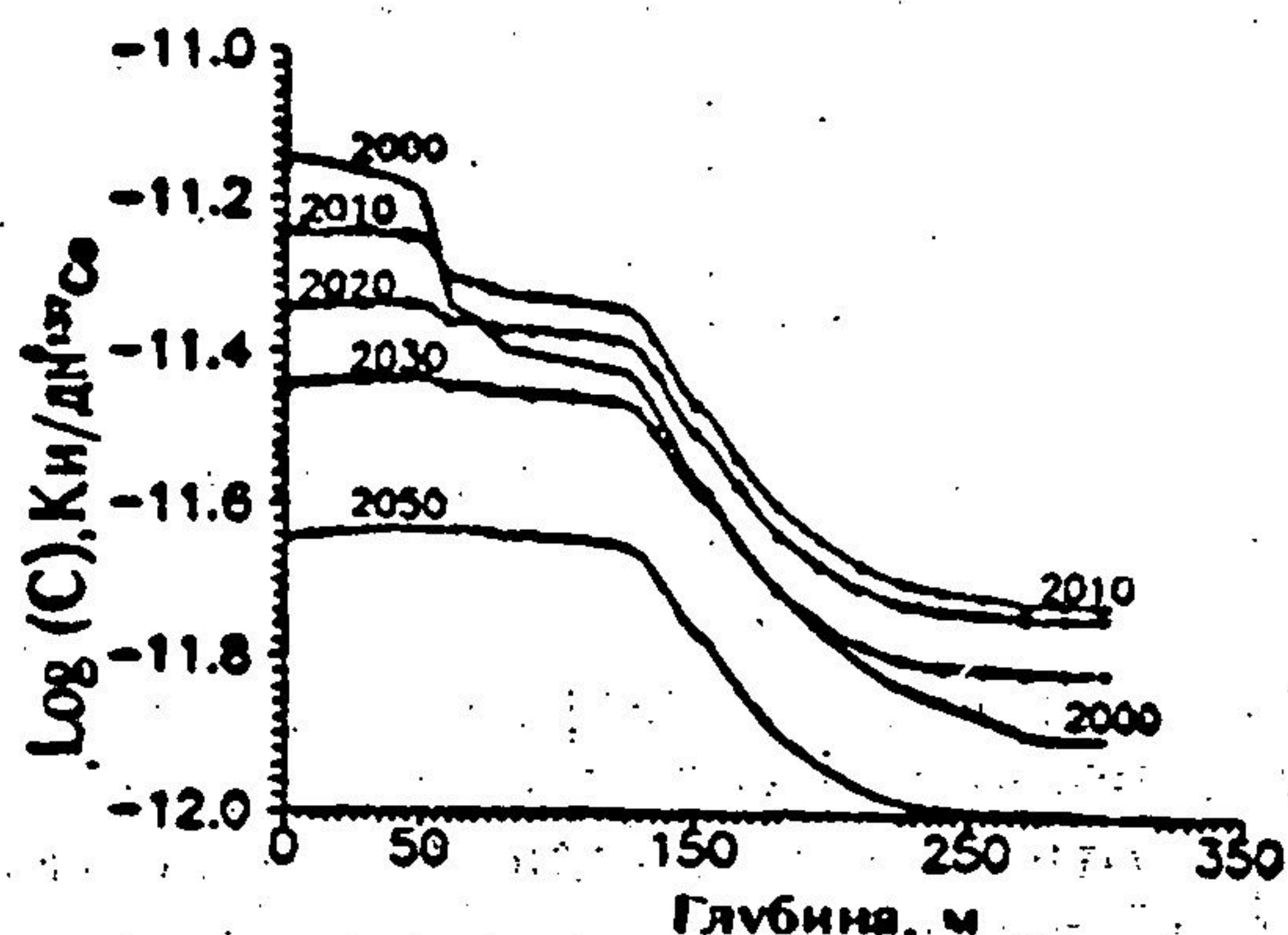


Рис. 4. Прогнозная концентрация ^{137}Cs в подземных водах (район г. Киева) до 2050 г.

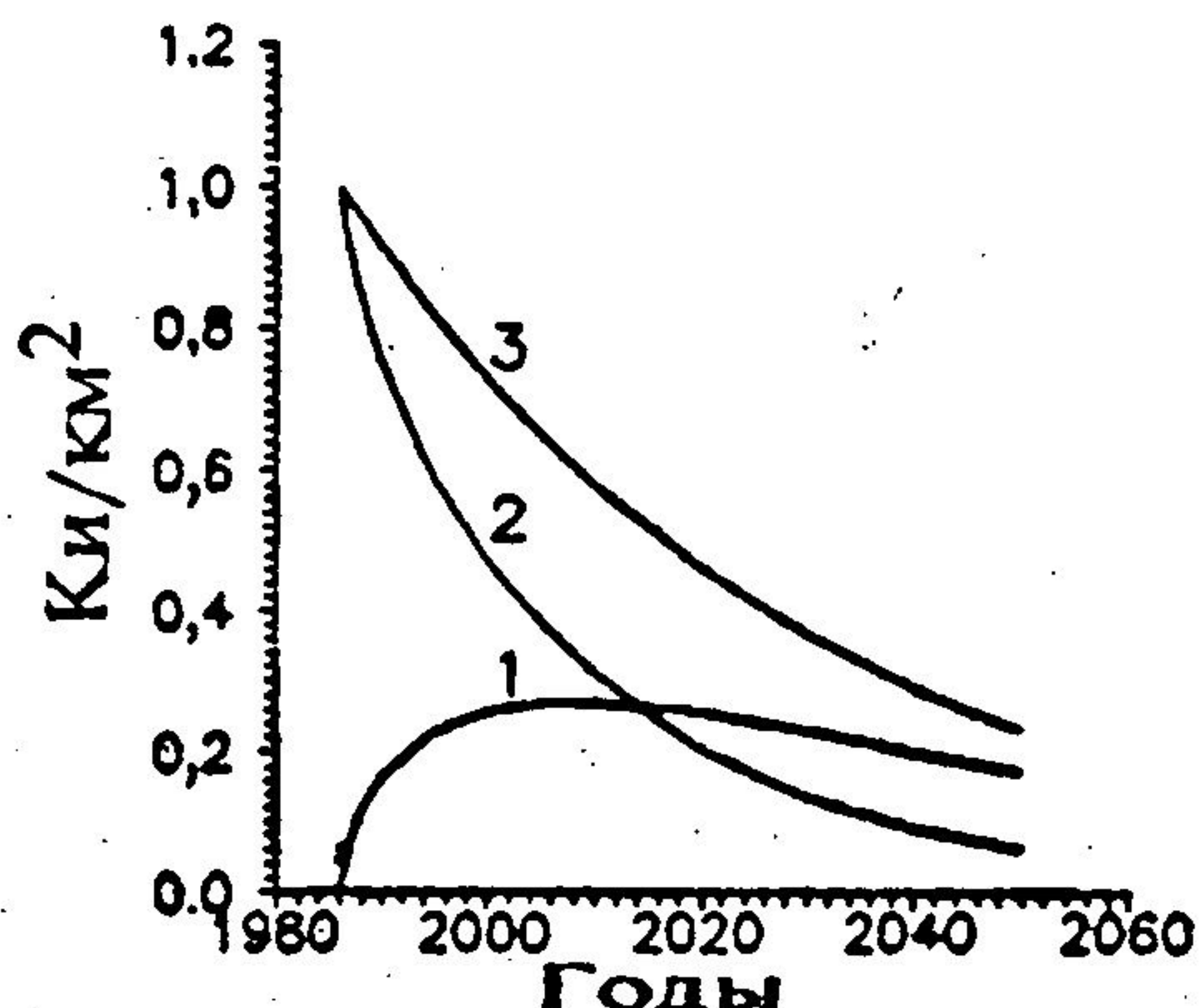


Рис. 5. Прогнозная концентрация ^{137}Cs в геологической среде пород (район г. Киева) до 2050 г. в единицах поверхностной плотности загрязнения: 1 — обменная форма (1—100 м); 2 — обменная и нерастворимая формы (0—1 м); 3 — сумма (0—100 м).

предположить возможность аккумуляции в геологической среде подземных вод до 30 % суммы первоначально выпавшего радиоактивного загрязнения поверхности (в пределах дальности активного влияния зон быстрой миграции радионуклидов). Это увязывается с концепцией существования путей аномально быстрой вертикальной миграции радионуклидов с поверхности в водоносные горизонты, и с другой стороны, указывает на важную роль геологической среды пород как мощного защитного буфера геосферы.

Максимальные концентрации загрязнения подземных вод и пород ^{137}Cs в районе г. Киева, согласно полученным прогнозам, будут наблюдаться в 2000—2010-е годы на глубинах 20—50 м до значений $8 \cdot 10^{-12} \text{ Ки}/\text{дм}^3$ в воде и до $2 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}/\text{дм}^3$ в породе. На глубинах 60—100 м максимальные концентрации ожидаются в 2010—2020-е годы до $2\text{—}3 \cdot 10^{-12} \text{ Ки}/\text{дм}^3$ в воде и до $10^{-11} \text{ Ки}/\text{дм}^3$ в породе. В зоне отчуждения ЧАЭС соответствующие максимальные значения концентрации, ожидаемые в 2010—2020-е годы в верхнем 20-метровом слое, существенно выше (на 2 порядка величины), но на глубине 80—100 м концентрация в жидкой фазе остается в пределах $(1\text{—}5) \cdot 10^{-12} \text{ Ки}/\text{дм}^3$.

Данные, полученные непосредственными замерами, и модельные оценки для ^{90}Sr (на базе модельных профилей для ^{137}Cs с соответствующим уменьшением коэффициента распределения K_d) показывают, что ожидаемые максимальные концентрации этого радионуклида значительно меньше предельно допустимых концентраций (рис. 6, 7). Эти данные, однако, требуют дополнительной проверки и периодического уточнения на основе мониторинга, который необходим.

Среди водозаборов зоны отчуждения ЧАЭС наиболее неблагоприятным в отношении возможного загрязнения является водозабор Припять. Проведенный анализ показывает, что загрязнение водозабора Припять ^{90}Sr , который является наиболее интенсивным мигрантом, с превышением предельно

допустимых концентраций в ближайшие 70 лет маловероятно. В связи с этим усилия должны быть направлены на проведение методологически обоснованного мониторинга, ближайшего к поверхности и нижележащего напорного водоносных горизонтов в непосредственной близости от водозаборных скважин (в радиусе 500—1000 м).

Результаты проведенных исследований по территориям с различными уровнями поверхностного загрязнения (зона отчуждения ЧАЭС и район

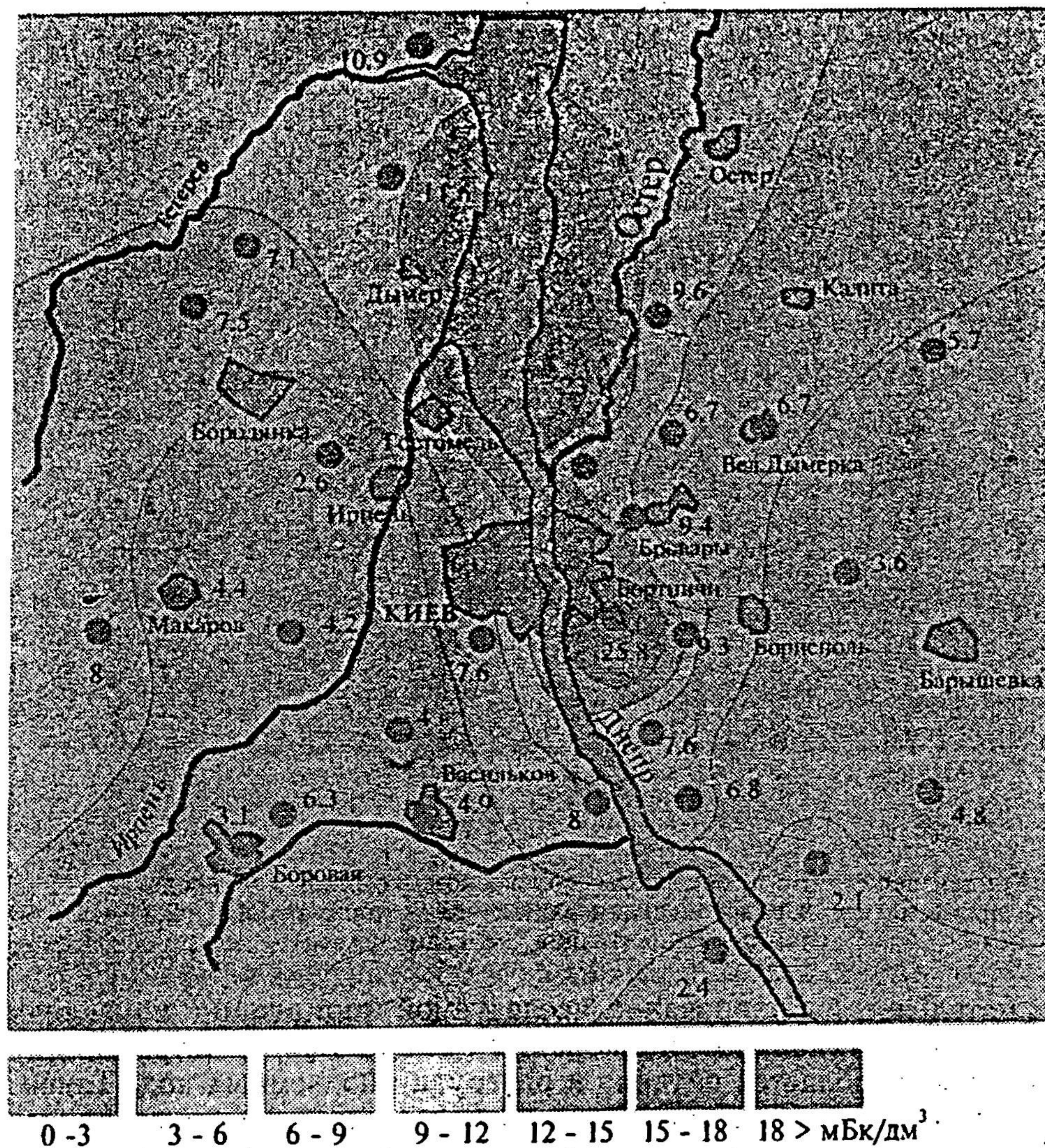


Рис. 6. Концентрация ^{90}Sr в четвертичном водоносном комплексе Киевской промышленно-городской агломерации; ● — точки отбора; 2. 1 — значения концентраций, мБк/дм³.

Киева) показывают, что несмотря на наличие путей быстрой миграции в верхней части зоны активного водообмена, подземные воды глубоких водоносных горизонтов остаются надежным источником питьевого водоснабжения, а геологическая среда пород является мощным барьером на пути вертикальной миграции радионуклидов.

По мере поступления новой информации о концентрациях радионуклидов в подземных водах и породах и уточнения сорбционных характеристик геологической среды, прогнозные оценки должны уточняться на базе новых модельных решений, что и составляет модельную основу мониторинга качества подземных вод.

Приведенные модельные оценки суммарного возможного накопления радионуклидов в геологической среде и подземных водах были выполнены для характерных участков исследуемых районов с нисходящим инфильтрационным потоком. Поэтому они, возможно, являются завышенными по отношению к средним оценкам, что соответствует концепции учета «максимального риска» в моделировании. Для уточнения прогноза необходимо

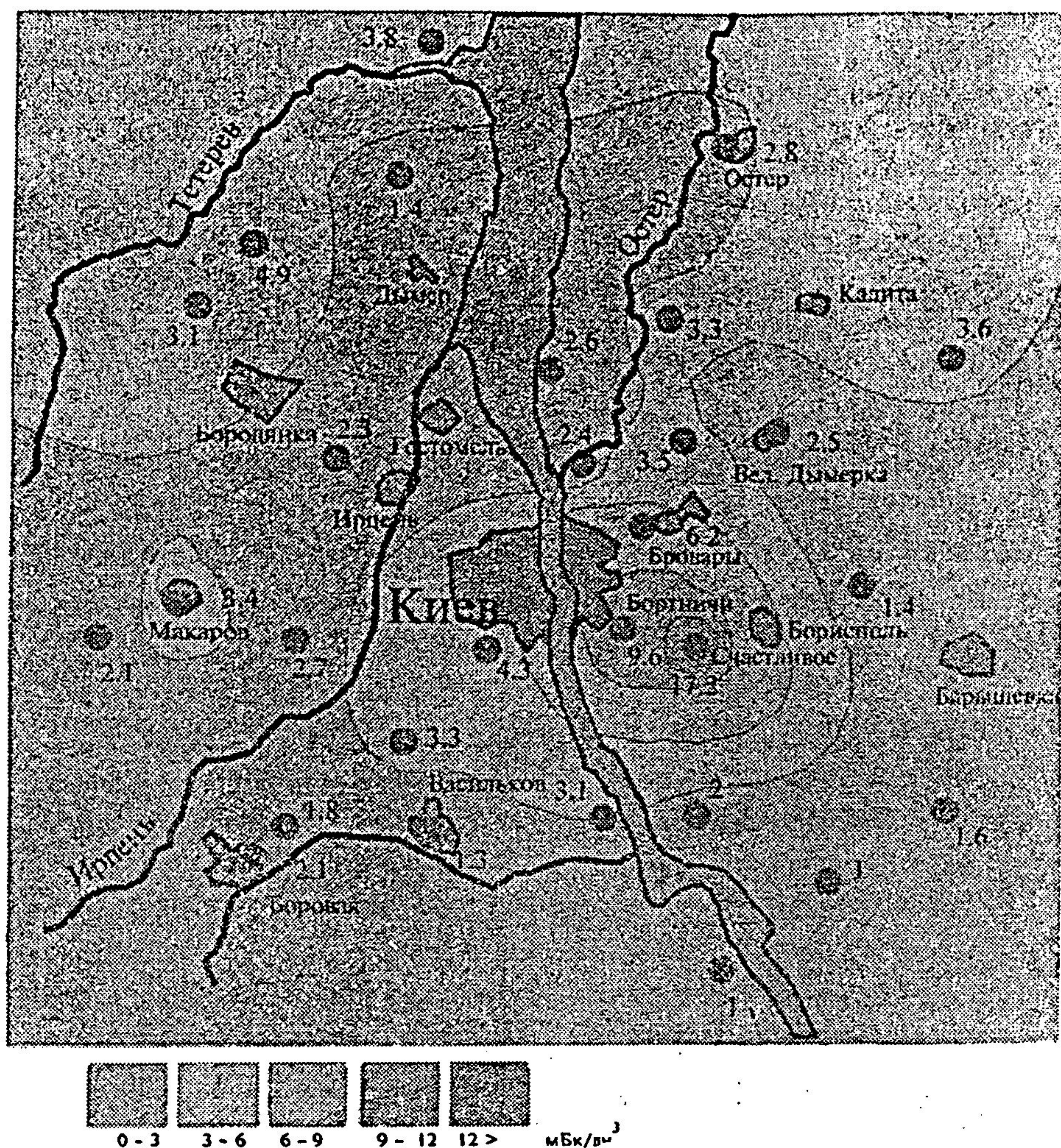


Рис. 7. Концентрация ^{90}Sr в эоценовом водоносном комплексе в пределах Киевской промышленно-городской агломерации: ● — точки отбора; 2.1 — значения концентрации, мБк/дм³

более тщательное районирование исследуемой территории по величине и направлению вертикальной компоненты скорости фильтрации, прежде всего, уточнение областей питания и разгрузки подземных вод. Такое уточнение может быть выполнено только на основе детального моделирования гидродинамического и миграционного режимов во всем многослойном гидрогеологическом комплексе исследуемой территории.

V. M. Shestopalov, A. S. Boguslawskij, V. M. Bubljas, V. V. Gudzenko, I. P. Onishchenko, Yu. F. Rudenko

STUDYING THE MIGRATION OF RADIONUCLIDES OF CHERNOBYL ORIGIN IN GROUNDWATER UTILIZED FOR POTABLE WATER SUPPLY OF KYIV

Summary

The analysis of field observational data and results of modeling are presented on groundwater and rock media contamination with radionuclides (^{137}Cs and ^{90}Sr) of Chernobyl origin in the region of major water intakes serving for potable water supply of Kiev industrial agglomeration. The data obtained enable to accept the possibility of accumulating in the geological rock medium of upper water-bearing system with downgoing infiltration flow a significant part of initial surface fallout contamination. This states in favor of the concept of anomalously fast migration pathways, but from the other hand, indicates the important role of geological rock media as a powerful protection buffer of the geosphere. Further studying of the character and pathways of groundwater radioactive contamination requires more precise in-

formation about the concentration of radionuclides in ground water and rocks, and also detailed regioning of the territory under studying, based on the data of hydrodynamic regime modeling and establishing of hydrogeological monitoring.

Scientific Engineering Centre of
Radio Ecology Research of
Presidium of National Academy of
Sciences of Ukraine, Kiev

1. Шестопалов В. М., Бублясь В. Н., Гудзенко В. В., Онищенко И. П., Бородавко И. В. // IV Междунар. научно-техн. конф. «Итоги 8 лет работ по ликвидации аварии на ЧАЭС». Чернобыль. научно-техн. центр междунар. исследований.— 1994.— Т. 1.— С. 110—119.
2. Shestopalov V. M., Gudzenko V. V., Rudenko Yu. F., Boguslavskij A. S. Combined analysis, modelling and forecast of longterm underground water contamination inside the chernobyl fallout influenced zone. «Hydrological Impact of Nuclear Power Plant Systems» (23—25.09.1992).— International Hydrological Programme. UNESCO Chernobyl programme.— Paris, 1992.
3. Shestopalov V. M., Rudenko Yu. F., Onishchenko I. P. // Int Conf. «One decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident» (Austria Center Vienna, 8—12 April 1996).— 1996.— P. 474—475.

Науч. инж. центр радиогидрогеоэколог.
исследований при Президиуме НАН Украины,
г. Киев

Поступила
10.06.96