ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2023, том 7, № 2, с. 5-39

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 556.383/388:504(571.1)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ МИГРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ В ЗОНЕ РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

© 2023 г. А.П. Белоусова, Е.Э. Руденко, К.Г. Власов

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: anabel@iwp.ru, belanna47@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023. После доработки 25.05.2023. Принята к публикации 26.05.2023.

Цель статьи – изучение методом математического моделирования процессов миграции различных, от слабо до сильно сорбируемых загрязняющих веществ (ЗВ), включая радионуклиды, из грунтовых в напорные подземные воды через раздельный слой – водоупор различной степени проницаемости. В практике гидрогеологических исследований существует такое направление, как поиски и разведка месторождений подземных вод. Первая стадия – поиск, осуществляется на практически неизученных территориях, а вторая – разведка, ограничивается территориями, где по данным первой стадии выявляют перспективные территории.

Данные исследования можно отнести к первой, поисковой стадии, когда изученность территории в рамках заданной тематики практически отсутствует для выбранной территории Калужской области, пострадавшей от аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС). Поиск был сосредоточен на изучении миграции загрязняющих веществ в грунтовых водах, а из них – через водоупор в напорных водах. Направление поиска определялось способностью водоупоров пропускать через себя ЗВ с одной стороны (самые неблагоприятные для подземных вод условия), а с другой – не пропускать ЗВ (благоприятные условия). В природных и в техногенных условиях оба случая не существуют по отдельности (они сливаются), что требует хорошей геолого-гидрогеологической изученности территории, отсутствующей для изучаемой местности. Наши исследования были проведены по обоим направлениям поисковых исследований, для первого случая водоупор принимался проницаемым, для второго – непроницаемым.

Для каждого типа поисковой стадии были проведены как бы разведочные численно-экспериментальные исследования (численный эксперимент) с применением математического моделирования. Объектом исследований является часть территории Калужской области, наиболее пострадавшая от аварии на ЧАЭС. Исследования по первому направлению были завершены и опубликованы ранее (Белоусова, Руденко, 2021а, б). Результаты второй стадии и обобщающие результаты исследований обоих поисковых направлений приводятся в настоящей статье. На данном этапе продолжается исследование процессов миграции различных ЗВ, включая радионуклиды, из грунтовых вод в напорный водоносный горизонт через непроницаемый водоупор по тем же разрезам, что и для первого направления, но по несколько измененным сценариям и с другим набором коэффициентов распределения сорбции ЗВ (Kd).

Численные эксперименты второго этапа проводилось по следующим сценариям: 1 – (1-3-1), 2 – (1-6-1), 3 – (1-10-1), 4 – (6-60-6), 5 – (26-260-26), 6 – (100-1000-100). Первая цифра – значение Kd (л/кг) в первом слое, вторая – во втором слое, третья – значение в третьем слое. Такой подбор коэффициентов распределения обусловлен заданием их значений на порядок больше в водоупоре, чем в верхнем и нижнем водоносных горизонтах.

Каждый сценарий проводился для двух условий: с радиоактивным распадом и без распада. За начальные условия была принята степень загрязнения грунтовых вод по аналогии со степенью загрязнения поверхности земли в зоне радиоактивного следа на изучаемой территории, хотя в природных условиях на этой территории в грунтовых водах такого распространения загрязнения ни радионуклидами, ни другими ЗВ не наблюдается.

Концентрации ЗВ могут быть заданы в г/л, ПДК, фоновых концентрациях; в нашем случае использовались ПДК. Коэффициенты распределения сорбции различных ЗВ подбирались из известных значений для территорий Брянской области (Белоусова, Руденко, 2021а, 2021б), для радионуклидов значения Kd в основном относятся к ненасыщенной зоне.
Установлено, что главными факторами формирования процессов миграции ЗВ являются в первую очередь радиоактивный распад ЗВ, во вторую – сорбционные свойства ЗВ, а в третью – гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий изучаемой территории и степени проницаемости водоупора. Рассмотренная ситуация свидетельствует о том, что водоупоры не являются полной гарантией, обеспечивающей защищенность напорных подземных вод от загрязнения.
Ключевые слова: грунтовые воды, подземные напорные воды, моделирование процессов миграции, загрязняющее вещество, радионуклиды, сорбция, радиоактивный распад.
DOI: 10.24412/2542-2006-2023-2-5-39
EDN: IBYXTQ

Объектом исследований являются напорные подземные воды на части территории Калужской области, наиболее пострадавшей от аварии на Чернобыльской атомной станции (ЧАЭС).

Цель работы – изучение методом численного эксперимента процессов миграции различных, от слабо до сильно сорбируемых загрязняющих веществ (ЗВ), включая радионуклиды, в грунтовых и напорных подземных водах в рамках математического моделирования. В процессе работы проведены следующие исследования и получены описываемые ниже результаты.

Численные эксперименты по возможным сценариям загрязнения подземных вод: 1 – (1-3-1), 2 – (1-6-1), 3 – (1-10-1), 4 – (6-60-6), 5 – (26-260-26), 6 – (100-1000-100).

Первая цифра – значение Kd (л/кг) в первом слое, вторая – во втором слое, третья – в третьем слое. Такой подбор коэффициентов распределения обусловлен заданием их значений на порядок больше в водоупоре, чем в верхнем и нижнем водоносных горизонтах. Каждый сценарий проводился для двух условий: с радиоактивным распадом и без распада. Моделирование процессов миграции ЗВ по каждому сценарию проводилось с использованием математической модели MT3D (Zheng, Papadopulos, 1990). Данная модель авторами использовалась при моделировании процессов геофильтрации и миграции загрязняющих веществ на территории Калужской области (Антонов и др., 2013; Белоусова, 2015; Белоусова, Руденко, 2021а).

Для изучения миграции загрязняющих веществ на ранее созданной численной модели MT3D были выбраны два разреза и несколько отдельных точек. Оценивалась экологическая ситуации в грунтовых водах, в водораздельном слое и в напорных подземных водах.

В результате моделирования проведено сравнение всех сценариев развития процессов загрязнения и анализ определяющих их факторов. Выявлено, что главными факторами формирования процессов миграции ЗВ являются в первую очередь радиоактивный распад ЗВ, во вторую – сорбционные свойства ЗВ, а в третью – гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий территории.

Установлено, что для непроницаемого типа водоупоров характерно практически полное отсутствие проникновения загрязненных грунтовых вод в напорный водоносный горизонт, а при проницаемом типе загрязнение проникает в напорные воды. Здесь следует отметить, что в природных условиях как полностью и повсеместно «непроницаемых», так и «проницаемых» водоупоров не существует, а имеет место распространение водоупорных толщ пород сложного литологического строения с техногенными и природными нарушениями.

Результаты научных исследований по данной тематике могут быть использованы при оценке экологического состояния подземных вод на различных территориях страны в различных масштабах; при проектировании и строительстве водозаборов пресных питьевых подземных вод; при проектировании и организации мониторинга за подземными водами в районах, пострадавших от аварии на ЧАЭС (Данные …, 2018; Радиационная обстановка ..., 2019).

Моделирование процессов геомиграции загрязняющих веществ

На предыдущем этапе исследований (Белоусова, Руденко, 2020) было показано, что существует опасность загрязнения грунтовых вод радионуклидами за счет их миграции с поверхности земли, загрязненной Чернобыльскими радионуклидами, на данном этапе исследований рассматривается и возможность загрязнения напорных вод от загрязненных грунтовых вод.

Гидрогеологические условия отличаются большим разнообразием водоносных горизонтов – как безнапорных, так и напорных (Белоусова, Руденко, 2021а, 2021б). Безнапорные горизонты включают в себя воды четвертичных (аллювиальных, гляциальных, флювиогляциальных, болотных, пролювиальных горизонтов), меловых и юрских отложений. Все эти горизонты связаны между собой и не имеют выдержанных водоупоров внутри этой толщи (комплекса).

Анализ существующего загрязнения подземных вод на территории Калужской области, проведенный нами на предыдущем этапе, показал наличие химического загрязнения в различных водоносных горизонтах. Загрязнению подвержены горизонты от четвертичного до девонского возраста, практически во всех горизонтах присутствует стабильный стронций, барий, фтор, нитраты, хлориды и сульфаты.

Анализ ЗВ по степени сорбируемости и их классификация были проведены на предыдущем этапе исследований по литературным данным. Как видно из данных анализа, значения Kd многих химических элементов значительно превышают тысячи л/кг (для Ni – 152-5365 л/кг), что зависит от литологического состава водовмещающих пород и от состояния самого элемента. Для оценки защищенности и уязвимости напорных подземных вод от загрязнения, поступающего из грунтовых вод, мы используем упрощенное представление о собрируемости и выделяем только 2 категории по степени сорбируемости: слабо сорбируемые (Kd = 0-6 л/кг) и сильно сорбируемые (Kd от 6 до 1000 л/кг). Далее будут более детально рассмотрены диапазоны изменения Kd.

Следует отметить, что изученность миграции радионуклидов относится в основном к ненасыщенной зоне – почвам и породам зоны аэрации (диапазон изменения Kd изменяется от 1 до более чем 1000 л/кг в зависимости от литологического состав пород), а в подземных водах такие исследования практически не проводились, поскольку считалось, что они защищены от проникновения радионуклидов, хотя в Брянской области они всё же были обнаружены в грунтовых водах (в незначительных количествах).

Таким образом, для моделирования процессов загрязнения грунтовых и напорных подземных вод были выбраны радионуклиды (^{137}Cs и ^{90}Sr) и другие сильно сорбируемые ЗВ, имеющие аналогичный диапазон коэффициентов распределения, а также нейтральные слабо сорбируемые ЗВ (нитраты, сульфаты, хлориды и нефтепродукты).

Для моделирования процесса массопереноса в подземных водах была выбрана модель MT3D, которая работает на основе транспортной модели MODFLOW (Белоусова, Руденко, 2021а, 2021б). Исходное распределение концентрации загрязняющих веществ в грунтовых водах условно принято по аналогии с поверхностным распределением радиоактивного загрязнения в чернобыльском следе на территории Калужской области. Их концентрация может задаваться в г/л, Бк/л, ПДК, фоновых концентрациях; мы использовали значения ПДК (рис. 1), но следует иметь в виду, что реально такого загрязнения в грунтовых водах в зоне радиоактивного загрязнения на изучаемой территории не наблюдается.

Для изучения миграции загрязняющих веществ на ранее созданной численной модели MT3D (Антонов и др., 2013) были выбраны два разреза: по линии I-I по направлению с северо-востока на юго-запад и по линии II-II по направлению с юго-запада на юго-восток изучаемой территории по линиям тока подземных вод от водораздела к области разгрузки, т.е. к реке (рис. 2).

Анализ экологической ситуации проводился по различным сценариям для четырех расчетных сроков: 30, 60, 100 и 300 лет (увязка с периодами полураспада радионуклидов и сроком действия водозаборов). Рассматриваются следующие сценарии загрязнения: с радиоактивным распадом для радионуклидов и без распада для других ЗВ, для слабо и сильно сорбируемых веществ.

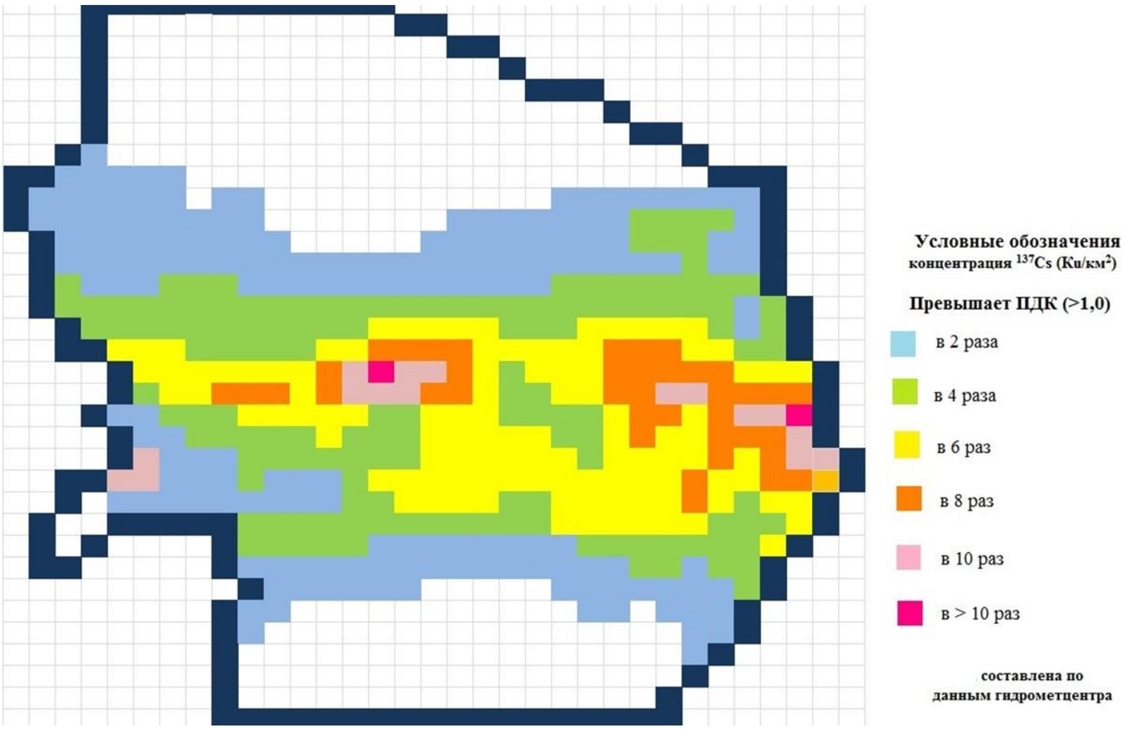


Рис. 1. Картосхема поверхностного загрязнения радионуклидом ^{137}Cs юга Калужской области (Карта …, 1991). **Fig. 1.** Cartographic chart of surface contamination with ^{137}Cs radionuclide in the south of Kaluga Region (Карта …, 1991).

Изменения концентрации загрязняющих веществ с различными Kd *без распада* для двух временных периодов (30 лет и 300 лет) для двух разрезов

Разрез I-I, начальные концентрации ЗВ в точках: 1 – 8, 11 – 6, 12 – 4, 13 – 2, 14 – 4, 15 – 2 ПДК.

Через 30 лет после аварии (табл. 1), как видно на рисунке 3а, наблюдается четкая тенденция объединения значений концентрации ЗВ с Kd от 1 до 10 (сценарии 1-3) и от 6 до 1000 (сценарии 4-6) в ***первом слое***. В точке 1 наблюдаются максимальные концентрации ЗВ 7-8 ПДК при сценариях 4-6 и уменьшение концентрации до 6-7 ПДК при сценариях 1-3; аналогичные ситуации наблюдаются в точках 11 и 14, а в точках 12, 13 и 15, находящихся в зоне разгрузки подземных вод, концентрации при всех значениях сравниваются и резко уменьшаются до 2 ПДК, что свидетельствует о более значительной роли гидродисперсии потока подземных вод. Концентрации после аварии при всех значениях Kd мало изменились по сравнению с начальными концентрациями в точках разреза до аварии. Во ***втором слое – водоупоре*** (рис. 3б) в точке 1 наблюдаются незначительные концентрации ЗВ по сценариям 1-3 (от 0.1 до 0.033 ПДК), по этим же сценариям в точках 11 и 14 наблюдаются еще меньшие, не превышающие 0.1 ПДК концентрации; в остальных точках наблюдаются малозначимые следы ЗВ. Загрязняющие вещества с большими Kd при сценариях 4-6 наблюдаются также в практически незначимых концентрациях. В ***третьем слое*** во всех точках при всех сценариях ЗВ не наблюдаются, т.е. они не проникают через водоупор.

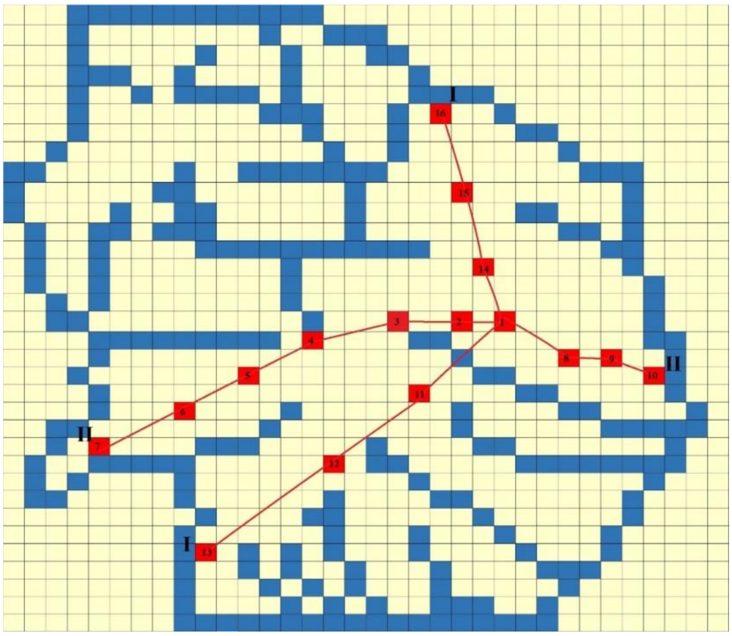


Рис. 2. Схематическое изображение размещения разрезов I-I и II-II с точками наблюдений на модели изучаемого объекта. **Fig. 2.** Schematic representation of the location of sections I-I and II-II with observation points on the model of the object under study.

Через 300 лет (табл. 2) после аварии (рис. 3в) в ***первом слое*** происходит явное перераспределение ЗВ по типу Kd: ЗВ с малыми Kd (сценарии 1-3) сильнее мигрируют в этом слое, а их незначительное количество попадает во второй слой; ЗВ с высокими Kd (сценарии 4-6) сохраняются в слое практически в тех же концентрациях. Во ***втором слое – водоупоре*** наблюдается значительное накопление ЗВ с малыми значениями Kd (сценарии 1-3) до 3.5 ПДК (рис. 3г), при этом накопление наблюдается только в точке 11, не очень значительное – в точках 1 и 14, в остальных – только следы. Следует отметить, что здесь произошло смещение максимальных концентраций ЗВ от точки 1 через 30 лет после аварии в точку 11 за счет гидродинамической дисперсии потока подземных вод, где точка 1 находится на водоразделе и из нее происходит растекание потока, концентрации ЗВ в котором накапливаются за долгое время. В ***третьем слое*** в пределах данного разреза накопление ЗВ не наблюдается.

Разрез II-II, начальные концентрации ЗВ в точках: 1 – 8, 2 – 6, 3 – 8, 4 – 12, 5 – 6, 6 – 2, 7 – 2, 8 – 10, 9 – 8, 10 – 12 ПДК.

Через 30 лет после аварии (табл. 1; рис. 4а) в ***первом слое*** складывается аналогичная с разрезом I ситуация и происходит та же дифференциация по сценариям, отмечается

Таблица 1. Изменение концентрации (ПДК) сильно сорбируемых загрязняющих веществ в грунтовых водах, водораздельном слое и напорных водах в процессе их миграции (30 и 60 лет). **Table 1.** Change in concentration of highly sorbed pollutants in groundwater, watershed and pressure water during their migration (30 and 60 years).

№ разреза	№ точки наблюдения	Kd 1-3-1				Kd 1-6-1				Kd 6-60-6			
		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада	
		Номер слоя											
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		30 лет											
I	13	0.989	0.00015	1.967	0.00020	0.989	0.00008	1.966	0.00010	0.867	0.00001	1.990	0.00001
	12	1.985	0.00037	3.945	0.00073	1.985	0.00028	3.945	0.00037	1.736	0.00003	3.990	0.00004
	11	2.891	0.00527	5.746	0.00695	2.891	0.00266	5.645	0.00351	2.589	0.00031	5.950	0.00036
	1	3.491	0.02430	6.938	0.03180	3.491	0.01230	6.938	0.01610	3.387	0.00148	7.786	0.00172
	14	1.890	0.00465	3.757	0.00613	1.890	0.00235	3.757	0.00309	1.719	0.00027	3.952	0.00032
	15	0.963	0.00033	1.913	0.00044	0.963	0.00017	1.913	0.00022	0.863	0.00002	1.983	0.00002
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
II	7	0.957	0.00066	1.902	0.00087	0.957	0.00033	1.901	0.00044	0.862	0.00039	1.980	0.00005
	6	0.976	0.00017	1.940	0.00045	0.976	0.00009	1.940	0.00012	0.865	0.00001	1.988	0.00001
	5	2.928	0.00033	5.829	0.00043	2.928	0.00017	5.819	0.00022	2.595	0.00002	5.965	0.00002
	4	5.873	0.00439	11.670	0.00581	5.873	0.00222	11.627	0.00293	5.193	0.00025	11.937	0.00030
	3	3.870	0.00075	7.691	0.00098	3.870	0.00038	7.691	0.00050	3.454	0.00004	7.940	0.00005
	2	2.814	0.02070	5.559	0.02730	2.814	0.01050	5.593	0.00014	2.575	0.00123	5.920	0.00143
	1	3.491	0.02430	6.938	0.03180	3.491	0.01230	6.938	0.01610	3.387	0.00148	7.786	0.00172
	8	4.635	0.02040	9.212	0.02685	4.635	0.01030	9.212	0.01300	4.283	0.00120	9.845	0.00141
	9	3.887	0.01470	7.726	0.01943	3.887	0.00743	7.726	0.00980	3.457	0.00086	7.947	0.00100
	10	5.771	0.02050	11.470	0.02712	5.771	0.01040	11.470	0.01300	5.176	0.00120	11.897	0.00141
		60 лет											
I	13	0.489	0.00024	1.933	0.00043	0.490	0.00012	1.933	0.00022	0.377	0.00001	1.978	0.00002
	12	0.985	0.00079	3.890	0.01344	0.985	0.00040	3.890	0.00068	0.755	0.00004	3.979	0.00007
	11	1.381	0.00805	5.454	0.01424	1.381	0.00406	5.453	0.00719	1.118	0.00046	5.892	0.00075
	1	1.474	0.03560	5.820	0.06137	1.474	0.01800	5.819	0.03100	1.428	0.00216	7.530	0.00953
	14	0.898	0.00637	3.545	0.01063	0.897	0.00322	3.545	0.00537	0.741	0.00036	3.909	0.00057
	15	0.462	0.00049	1.826	0.00086	0.462	0.00025	1.825	0.00043	0.373	0.00003	1.965	0.00005
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
II	7	0.458	0.00097	1.808	0.00167	0.458	0.00049	1.808	0.00084	0.372	0.00006	1.962	0.00009
	6	0.476	0.00026	1.882	0.00045	0.476	0.00013	1.882	0.00023	0.375	0.00001	1.976	0.00002
	5	1.428	0.00048	5.640	0.00083	1.428	0.00024	5.640	0.00042	1.125	0.00003	5.929	0.00004
	4	2.870	0.00662	11.335	0.01164	2.870	0.00334	11.335	0.00587	2.252	0.00037	11.870	0.00061
	3	1.866	0.00118	7.367	0.00213	1.865	0.00060	7.367	0.00107	1.494	0.00007	7.875	0.00012
	2	1.313	0.03050	5.185	0.05309	1.313	0.01540	5.185	0.02080	1.107	0.00180	5.896	0.00287
	1	1.474	0.03560	5.820	0.06137	1.474	0.01800	5.819	0.03100	1.428	0.00216	7.530	0.00953
	8	2.134	0.03020	8.425	0.05249	2.134	0.01520	8.425	0.02652	1.836	0.00170	9.679	0.00286
	9	1.875	0.02280	7.406	0.04060	1.875	0.01150	4.405	0.02052	1.496	0.00130	7.883	0.00213
	10	2.773	0.03040	10.950	0.05296	2.773	0.01540	10.950	0.02674	2.238	0.00170	11.793	0.00279

Продолжение таблицы 1.

№ разреза	№ точки наблюдения	Кв 1-10-1				Kd 100-1000-100				Kd 26-260-26			
		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада	
		Номер слоя											
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		30 лет											
I	13	0.989	0.00005	1.966	0.00006	0.843	0.00000	1.990	0.00000	0.842	0.00000	1.998	0.00000
	12	1.985	0.00017	3.945	0.00022	1.686	0.00000	3.990	0.00000	1.684	0.00001	3.998	0.00001
	11	2.891	0.00160	5.745	0.00211	2.528	0.00002	5.990	0.00002	2.524	0.00007	5.988	0.00008
	1	3.491	0.00739	6.938	0.00969	3.366	0.00009	7.980	0.00010	3.350	0.00035	7.949	0.00040
	14	1.890	0.00141	3.757	0.00186	1.685	0.00002	3.990	0.00002	1.681	0.00006	3.998	0.00007
	15	0.963	0.00010	1.913	0.00013	0.843	0.00000	1.990	0.00000	0.841	0.00000	1.996	0.00001
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
II	7	0.957	0.00020	1.901	0.00027	0.843	0.00000	1.990	0.00000	0.841	0.00001	1.995	0.00001
	6	0.976	0.00005	1.940	0.00007	0.843	0.00000	1.990	0.00000	0.841	0.00000	1.997	0.00000
	5	2.928	0.00010	5.819	0.00013	2.528	0.00000	5.990	0.00000	2.525	0.00000	5.991	0.00001
	4	5.873	0.00134	11.672	0.00176	5.056	0.00002	11.990	0.00002	5.051	0.00006	11.985	0.00007
	3	3.870	0.00026	7.691	0.00030	3.370	0.00000	8.000	0.00000	3.366	0.00001	7.985	0.00001
	2	2.814	0.00631	5.592	0.00830	2.527	0.00008	5.990	0.00009	2.520	0.00129	5.981	0.00033
	1	3.491	0.00739	6.938	0.00969	3.366	0.00009	7.980	0.00010	3.350	0.00035	7.949	0.00040
	8	4.635	0.00620	9.212	0.00816	4.210	0.00008	9.990	0.00009	4.199	0.00028	9.963	0.00021
	9	3.887	0.00448	7.726	0.00591	3.371	0.00005	7.990	0.00006	3.367	0.00020	7.987	0.00017
	10	5.771	0.00625	11.470	0.00824	5.055	0.00007	11.990	0.00009	5.047	0.00028	11.975	0.00033
		60 лет											
I	13	0.489	0.00007	1.933	0.00013	0.355	0.00000	1.990	0.00000	0.354	0.00000	1.997	0.00001
	12	0.985	0.00024	3.891	0.00041	0.710	0.00000	3.990	0.00000	0.709	0.00001	3.995	0.00002
	11	1.381	0.00245	5.453	0.00433	1.065	0.00003	5.990	0.00005	1.060	0.00011	5.974	0.00018
	1	1.473	0.01080	5.819	0.01870	1.420	0.00013	7.970	0.00022	1.400	0.00051	7.887	0.00083
	14	0.898	0.00194	3.545	0.00323	0.710	0.00002	3.990	0.00003	0.707	0.00009	3.978	0.00013
	15	0.462	0.00015	1.825	0.00026	0.355	0.00000	1.990	0.00000	0.354	0.00001	1.992	0.00001
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
II	7	0.458	0.00029	1.808	0.00051	0.355	0.00000	1.990	0.00001	0.353	0.00001	1.991	0.00002
	6	0.477	0.00008	1.882	0.00014	0.355	0.00000	1.990	0.00000	0.354	0.00000	1.995	0.00001
	5	1.428	0.00015	5.640	0.00025	1.065	0.00000	5.990	0.00000	1.060	0.00001	5.983	0.00001
	4	2.870	0.00201	11.335	0.00354	2.130	0.00002	11.990	0.00004	2.126	0.00009	11.969	0.00014
	3	1.866	0.00036	7.367	0.00065	1.420	0.00000	7.990	0.00001	1.410	0.00002	7.970	0.00003
	2	1.313	0.00931	5.185	0.01620	1.064	0.00011	5.980	0.00017	1.050	0.00042	5.967	0.00067
	1	1.473	0.01080	5.819	0.01870	1.420	0.00013	7.970	0.00022	1.400	0.00051	7.887	0.00083
	8	2.133	0.00919	8.425	0.01590	1.773	0.00011	9.970	0.00017	1.760	0.00041	9.923	0.00067
	9	1.875	0.00694	7.405	0.01236	1.420	0.00008	7.990	0.00013	1.420	0.00030	7.972	0.00050
	10	2.774	0.00925	10.953	0.01610	2.129	0.00011	11.980	0.00017	2.120	0.00040	11.951	0.00065

Примечание к таблицам 1-2: информация по третьему слою не приводится, поскольку значения в точках наблюдения равны нулю.

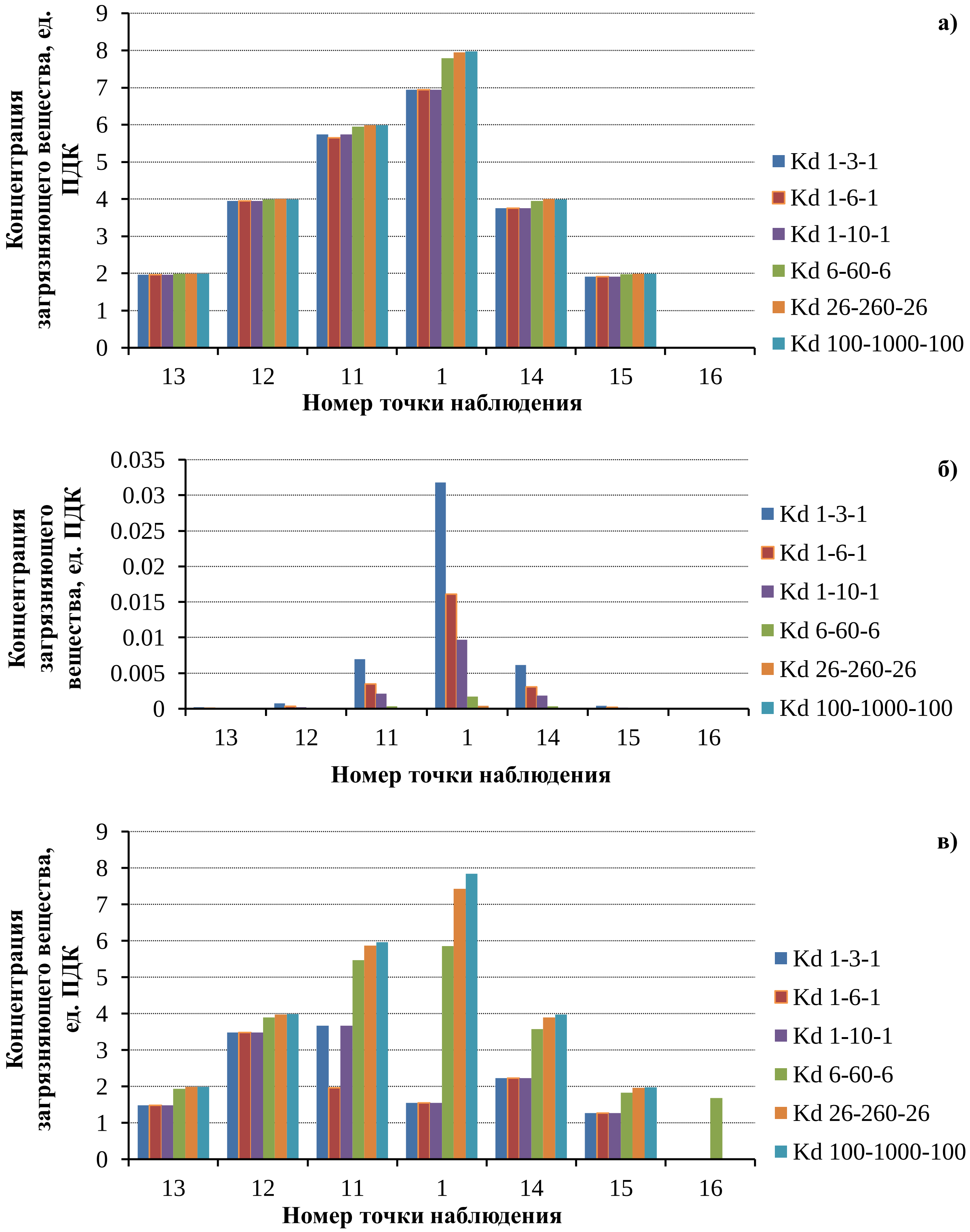


Рис. 3а, б, в. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез I без распада: а) 30 лет, слой 1; б) 30 лет, слой 2; в) 300 лет, слой 1. **Fig. 3а, б, в.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section I-I: а) 30 years, layer 1 without decay; б) 30 years, layer 2 without decay; в) 300 years, layer 1 without decay.

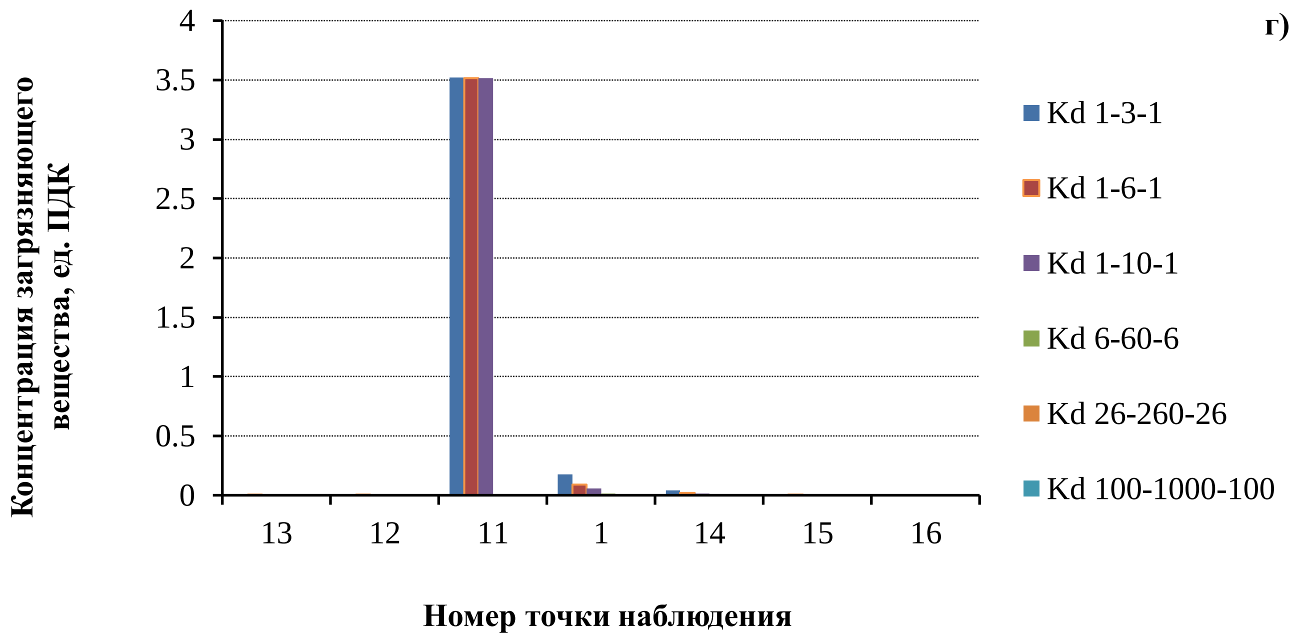


Рис. 3г. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез I без распада: г) 300 лет, слой 2. **Fig. 3г.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section I-I: г) 300 years, layer 2 without decay.

незначительное отличие концентраций ЗВ от начальных значений. Этот разрез отличается большими концентрациями ЗВ, максимальные составляют 12 ПДК. Во ***втором слое – водоупоре*** (рис. 4б) отмечаются аналогичные с разрезом I тенденции: происходит незначительное накопление ЗВ по сценариям 1-3, но концентрации не превышают 0.33 ПДК при самом малом Kd, а при большим Kd следы ЗВ малозначимы. Также отмечается роль гидродисперсии потока подземных вод, приводящая к некоторому смещению максимальных концентраций от одних точек к другим: например, от точки 8 в первом слое к точке 1 во втором. ***Третий слой*** – нулевая концентрация ЗВ.

Через 300 лет (табл. 2) после аварии (рис. 4в) в ***первом слое*** происходит аналогичное перераспределение ЗВ по типу Kd: ЗВ с малыми Kd (сценарий 1-3) сильнее мигрируют в этом слое, а их незначительное количество попадает во второй слой; ЗВ с высокими Kd (сценарии 4-6) сохраняются в слое практически в первоначальных концентрациях. Во ***втором слое –водоупоре*** наблюдается незначительное накопление ЗВ с малыми значениями Kd (сценарии 1-3) – до 0.22 ПДК (рис. 4г), при этом незначительное накопление наблюдается во всех точках кроме 5-7, где отмечается практически нулевое накопление. Следует отметить, что здесь также произошло смещение максимальных концентраций ЗВ от одних точек к другим за счет гидродинамической дисперсии потока подземных вод. В ***третьем слое*** накопление ЗВ не наблюдается.

Кроме рассмотренных временных интервалов были проведены расчеты на 60 и 100 лет, результаты которых приведены в таблицах 1 и 2.

Изменения концентрации загрязняющих веществ с различными Kd ***с распадом*** для двух временных периодов (30 лет и 300 лет) для двух разрезов

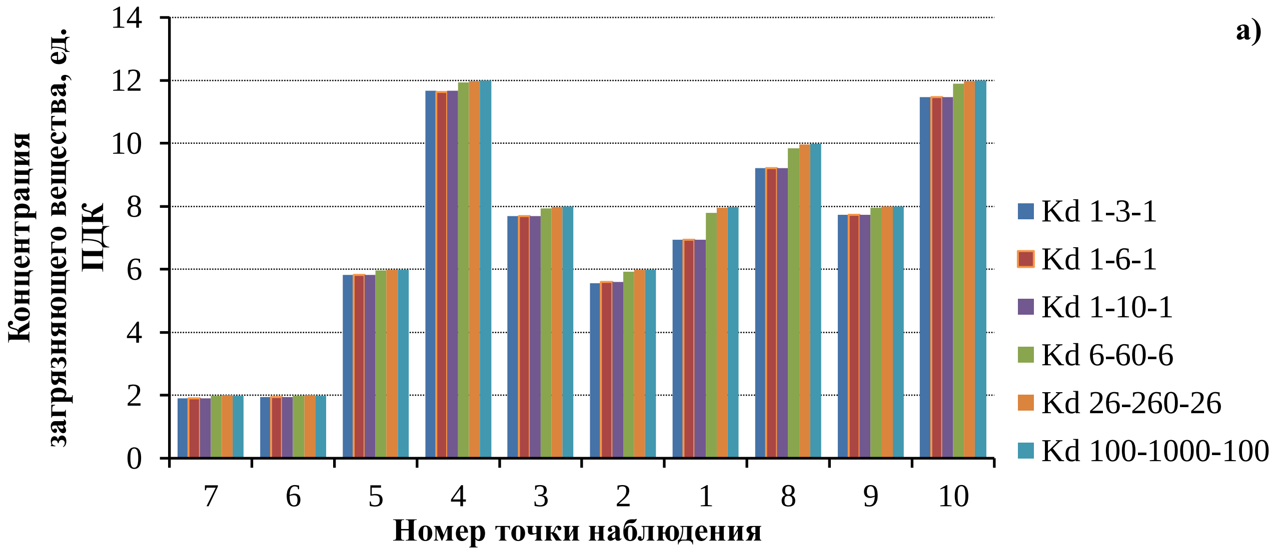
Разрез I-I, начальные концентрации ЗВ в точках: 1 – 8, 11 – 6, 12 – 4, 13 – 2, 14 – 4, 15 – 2 ПДК.

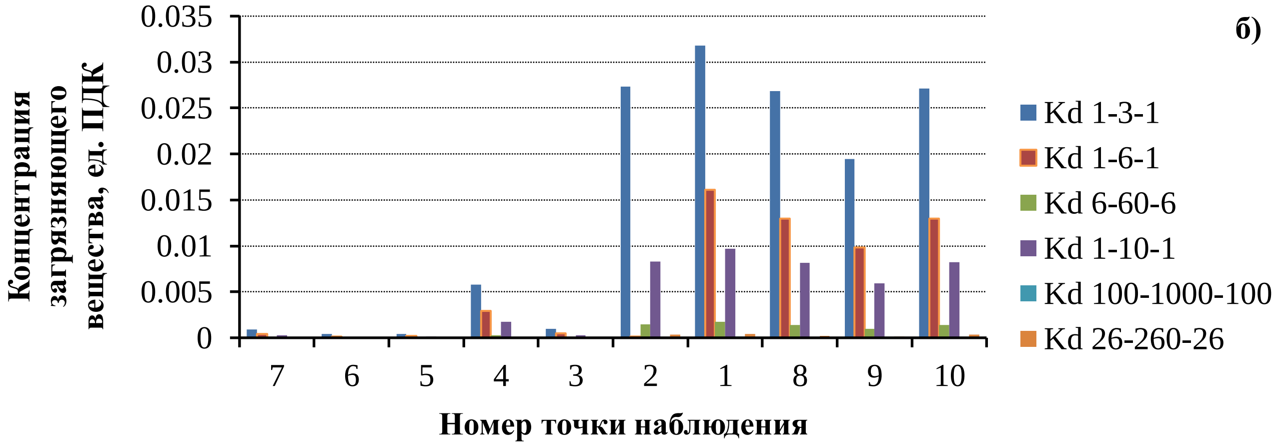
Таблица 2. Изменение концентрации (ПДК) сильно сорбируемых загрязняющих веществ в грунтовых водах, водораздельном слое и напорных водах в процессе их миграции (100 и 300 лет). **Table 2.** Change in concentration of highly sorbed pollutants in groundwater, watershed and pressure water during their migration (100 and 300 years).

№ разреза	№ точки наблюдения	Kd 1-3-1				Kd 1-6-1				Kd 6-60-6			
		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада	
		Номер слоя											
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		100 лет											
	13	0.191	0.00027	1.891	0.00066	0.191	0.00014	1.891	0.00033	0.110	0.00002	1.978	0.00003
	12	0.386	0.00100	3.820	0.00241	0.386	0.00050	3.820	0.00112	0.220	0.00005	3.965	0.00013
	11	0.524	0.00926	5.193	0.02200	0.524	0.00468	5.193	0.01111	0.325	0.00510	5.837	0.00119
I	1	0.503	0.04010	4.978	0.09000	0.503	0.02030	4.977	0.04570	0.406	0.00244	7.309	0.00551
	14	0.328	0.00808	3.246	0.01900	0.328	0.00408	3.246	0.00959	0.214	0.00046	3.844	0.00105
	15	0.177	0.00058	1.725	0.00137	0.174	0.00029	1.725	0.00069	0.108	0.00003	1.944	0.00007
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
	7	0.170	0.00116	1.690	0.00274	0.170	0.00059	1.690	0.00138	0.107	0.00007	1.937	0.00015
	6	0.183	0.00031	1.810	0.00073	0.183	0.00015	1.809	0.00037	0.109	0.00002	1.962	0.00004
	5	0.548	0.00058	5.419	0.00139	0.551	0.00029	5.419	0.00070	0.327	0.00003	5.884	0.00007
	4	1.106	0.00781	10.934	0.01870	1.060	0.00394	10.943	0.00945	0.655	0.00043	11.790	0.00099
	3	0.709	0.00132	7.018	0.00313	0.709	0.00066	7.018	0.00158	0.433	0.00002	7.803	0.00017
II	2	0.480	0.03560	4.748	0.08360	0.479	0.01810	4.747	0.04233	0.319	0.00204	5.738	0.00470
	1	0.503	0.04010	4.978	0.09000	0.503	0.02030	4.977	0.04570	0.406	0.00244	7.309	0.00551
	8	0.769	0.03490	7.608	0.08130	0.769	0.01770	7.607	0.04111	0.528	0.00200	9.493	0.00462
	9	0.709	0.02590	7.017	0.06200	0.709	0.01310	7.016	0.03134	0.435	0.00140	7.828	0.00319
	10	1.010	0.03590	10.018	0.08490	1.012	0.01820	10.010	0.04291	0.648	0.00200	11.661	0.00464
		300 лет											
	13	0.002	0.00031	1.477	0.002	0.002	0.00031	1.477	0.00097	0.000	0.00002	1.936	0.00011
	12	0.004	0.00108	3.483	0.006	0.004	0.00108	3.483	0.00313	0.001	0.00006	3.896	0.00033
	11	0.004	0.00927	3.673	3.520	0.004	0.00927	1.962	3.51700	0.001	0.00055	5.463	0.00368
I	1	0.003	0.04170	1.550	0.177	0.003	0.04170	1.547	0.09070	0.001	0.00260	5.848	0.01580
	14	0.002	0.00857	2.229	0.041	0.002	0.00857	2.223	0.02000	0.001	0.00048	3.571	0.00260
	15	0.001	0.00063	1.262	0.004	0.001	0.00063	1.262	0.00183	0.000	0.00003	1.832	0.00022
	16	0.000	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	1.676	0.00000
	7	0.001	0.00126	1.739	0.007	0.001	0.00126	1.739	0.00362	0.000	0.00007	1.817	0.00042
	6	0.002	0.00034	1.849	0.002	0.002	0.00034	1.849	0.00105	0.000	0.00002	1.887	0.00012
	5	0.005	0.00064	4.401	0.004	0.005	0.00064	4.401	0.00185	0.001	0.00003	5.656	0.00021
	4	0.009	0.00859	8.548	0.052	0.009	0.00859	8.550	0.02610	0.002	0.00045	11.360	0.00298
	3	0.005	0.00147	5.262	0.093	0.005	0.00147	5.262	0.00471	0.001	0.00008	7.387	0.00056
II	2	0.004	0.03760	2.723	0.195	0.004	0.03760	2.716	0.09960	0.001	0.00220	5.213	0.01360
	1	0.003	0.04170	1.550	0.177	0.003	0.04170	1.547	0.09070	0.001	0.00260	5.848	0.01580
	8	0.005	0.03720	4.210	0.190	0.005	0.03720	4.201	0.09600	0.001	0.00210	8.476	0.01350
	9	0.006	0.02830	5.261	0.174	0.006	0.02830	5.257	0.08843	0.001	0.00150	7.415	0.01050
	10	0.006	0.04000	6.209	0.209	0.006	0.04000	6.206	0.10600	0.002	0.00210	10.998	0.01350

Продолжение таблицы 2.

№ разреза	№ точки наблюдения	Kd 1-10-1				Kd 100-1000-100				Kd 26-260-26			
		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада		С распадом		Без распада	
		Номер слоя											
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		100 лет											
I	13	0.191	0.00008	1.890	0.00020	0.101	0.00000	1.990	0.00000	0.100	0.00000	1.995	0.00001
	12	0.386	0.00030	3.820	0.00073	0.202	0.00000	3.990	0.00001	0.202	0.00001	3.990	0.00003
	11	0.525	0.00282	5.193	0.00669	0.303	0.00003	5.980	0.00007	0.301	0.00012	5.961	0.00028
	1	0.503	0.01226	4.976	0.02756	0.402	0.00015	7.950	0.00035	0.396	0.00057	7.831	0.00133
	14	0.328	0.00246	3.246	0.00578	0.202	0.00003	3.990	0.00006	0.200	0.00010	3.963	0.00025
	15	0.174	0.00018	1.725	0.00042	0.101	0.00000	1.990	0.00000	0.100	0.00001	1.987	0.00002
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
II	7	0.171	0.00035	1.690	0.00083	0.101	0.00000	1.990	0.00009	0.100	0.00002	1.984	0.00003
	6	0.183	0.00009	1.809	0.00022	0.101	0.00000	1.990	0.00000	0.100	0.00000	1.990	0.00001
	5	0.547	0.00018	5.419	0.00042	0.303	0.00000	5.990	0.00000	0.302	0.00001	5.972	0.00002
	4	1.106	0.00237	10.943	0.00569	0.607	0.00003	11.980	0.00006	0.604	0.00010	11.950	0.00023
	3	0.709	0.00040	7.018	0.00095	0.404	0.00000	7.980	0.00001	0.402	0.00002	7.953	0.00004
	2	0.479	0.01090	4.747	0.02550	0.303	0.00012	5.980	0.00029	0.300	0.00048	5.937	0.00110
	1	0.503	0.01226	4.976	0.02756	0.402	0.00015	7.950	0.00035	0.396	0.00057	7.831	0.00133
	8	0.769	0.01060	7.607	0.02477	0.505	0.00012	9.960	0.00028	0.500	0.00047	9.878	0.00109
	9	0.709	0.00791	7.016	0.01800	0.404	0.00009	7.990	0.00021	0.400	0.00033	7.958	0.00077
	10	1.012	0.01090	10.017	0.02585	0.606	0.00012	11.980	0.00028	0.603	0.00047	9.917	0.00108
		300 лет											
I	13	0.002	0.00009	1.476	0.00059	0.000	0.00000	1.990	0.00001	0.000	0.00000	1.984	0.00003
	12	0.004	0.00033	3.483	0.00188	0.000	0.00000	3.990	0.00002	0.000	0.00001	3.975	0.00008
	11	0.004	0.00856	3.672	3.51600	0.001	0.00003	5.965	0.00023	0.001	0.00013	5.869	0.00088
	1	0.002	0.01300	1.544	0.05480	0.001	0.00016	7.847	0.00100	0.001	0.00060	7.430	0.00410
	14	0.002	0.00262	2.227	0.01249	0.000	0.00003	3.972	0.00016	0.000	0.00010	3.894	0.00063
	15	0.001	0.00019	1.262	0.00410	0.000	0.00000	1.980	0.00001	0.000	0.00001	1.959	0.00005
	16	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000	0.00000
II	7	0.001	0.00038	1.739	0.00218	0.000	0.00000	1.980	0.00003	0.000	0.00002	1.955	0.00010
	6	0.002	0.00010	1.365	0.00063	0.000	0.00000	1.990	0.00001	0.000	0.00000	1.973	0.00005
	5	0.005	0.00019	4.401	0.00112	0.001	0.00000	5.980	0.00001	0.001	0.00001	5.917	0.00005
	4	0.009	0.00262	8.548	0.01575	0.002	0.00003	11.960	0.00018	0.002	0.00010	11.846	0.00070
	3	0.005	0.00045	5.262	0.01136	0.001	0.00000	7.960	0.00004	0.001	0.00002	7.851	0.00013
	2	0.003	0.01170	2.713	0.06000	0.001	0.00013	5.948	0.00087	0.001	0.00050	5.804	0.00332
	1	0.002	0.01300	1.544	0.05480	0.001	0.00016	7.847	0.00100	0.001	0.00060	7.430	0.00410
	8	0.005	0.01150	4.198	0.05845	0.001	0.00013	9.890	0.00087	0.001	0.00049	9.617	0.00332
	9	0.006	0.00873	5.255	0.05339	0.001	0.00009	7.960	0.00066	0.001	0.00035	7.858	0.00251
	10	0.006	0.01190	6.205	0.06396	0.002	0.00013	11.935	0.00084	0.001	0.00049	11.755	0.00378





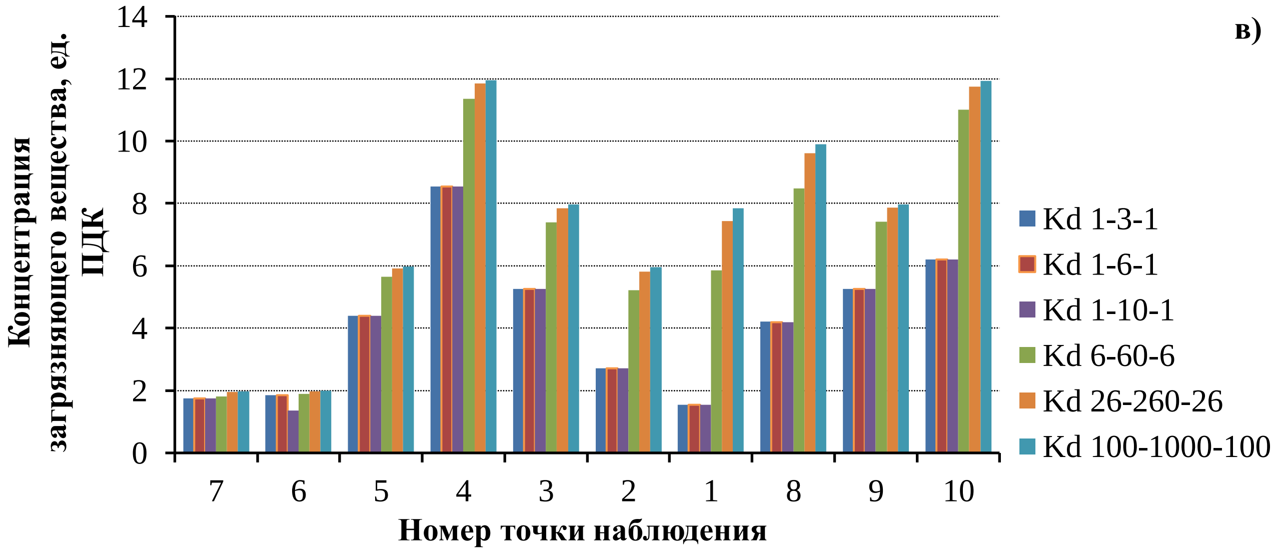


Рис. 4а, б, в. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез II без распада: а) 30 лет, слой 1; б) 30 лет, слой 2; в) 300 лет, слой 1. **Fig. 4а, б, в.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section II: а) 30 years, layer 1 without decay; б) 30 years, layer 2 without decay; в) 300 years, layer 1 without decay.

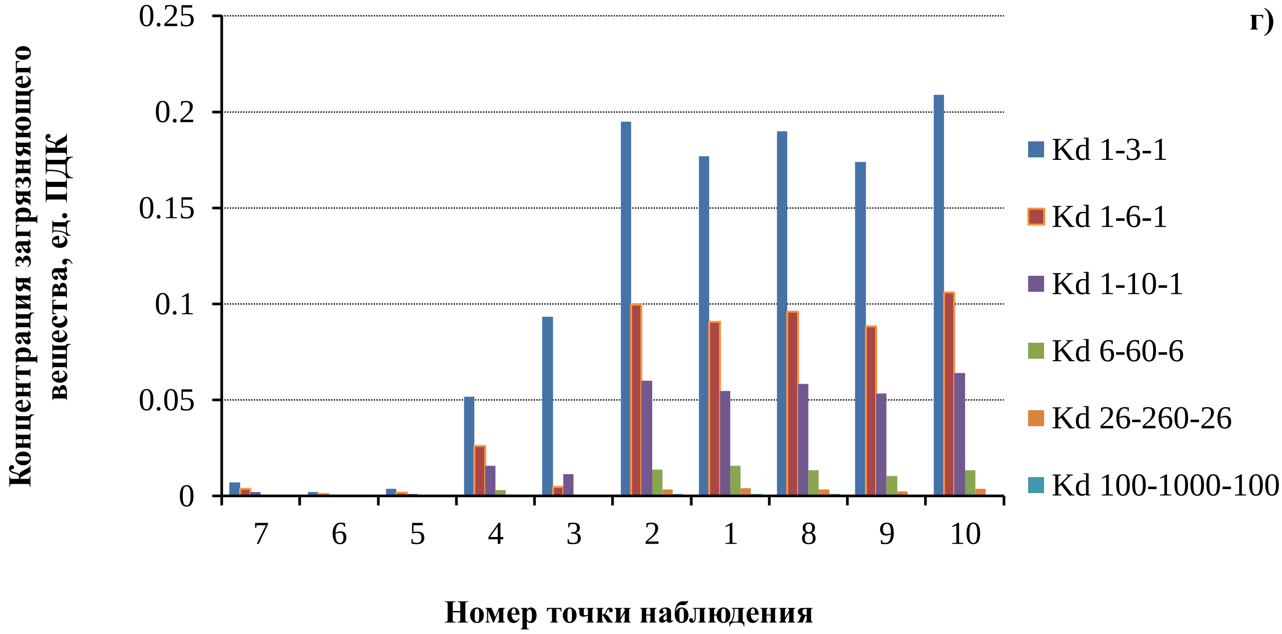


Рис. 4г. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез II без распада: г) 300 лет, слой 2. **Fig. 4г.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section II: г) 300 years, layer 2 without decay.

Через 30 лет после аварии (табл. 1; рис. 5а) в ***первом слое*** наблюдается та же тенденция группировки ЗВ по Kd, что и для ЗВ с распадом в этом же слое, но концентрации этих веществ практически вдвое меньше (3.5 ПДК), чем у ЗВ без распада, т.к. уже прошел один период полураспада (30 лет для радионуклидов), а также наблюдается влияние гидродисперсии потока подземных вод, более эффективное на ЗВ с меньшим Kd и на их накоплении путем перетекания в соседние расчетные ячейки, но менее эффективное на очень сильно сорбируемые ЗВ. Во ***втором слое – водоупоре*** наблюдается абсолютно аналогичная картина (рис. 5б), как и в слое 2 на первом разрезе, только концентрации ЗВ несколько уменьшаются: например, в точке 1 без распада – 0.032 ПДК, а с распадом – 0.024, т.е. в водоупоре накапливается меньше слабо сорбируемых ЗВ с распадом, а сильно сорбирумые ЗВ оставляют только следы. ***Третий слой*** – нулевая концентрация ЗВ.

Через 300 лет (табл. 2) после аварии (рис. 5в) в ***первом слое*** происходит практически полное удаление ЗВ (до < 0.001 ПДК) с высокими значениями Kd (сценарии 4-6) и отмечается лишь незначительное содержание ЗВ (до 0.004 ПДК) с низкими значениями Kd (сценарии 1-3).

Таким образом, можно говорить о почти полном распаде радиоактивных ЗВ с различными Kd. Во ***втором слое*** – ***водоупоре*** (рис. 5г) наблюдается некоторое увеличение концентрации ЗВ по сравнению с периодом на 30 лет после аварии: например, в точке 1 после 30 лет концентрация слабо сорбируемых веществ достигала 0.025 ПДК (рис. 5б), а на 300 лет увеличилась до 0.042 ПДК, что также не является значимой величиной, а только свидетельствует о наличии следов данных ЗВ в водоупоре. ***Третий слой*** – нулевая концентрация ЗВ.

Разрез II-II, начальные концентрации ЗВ в точках: 1 – 8, 2 – 6, 3 – 8, 4 – 12, 5 – 6, 6 – 2, 7 – 2, 8 – 10, 9 – 8, 10 – 12 ПДК.

Через 30 лет после аварии (табл. 1; рис. 6а) общие тенденции распределения концентраций радиоактивных ЗВ в ***первом слое*** совпадают с нерадиоактивными (рис. 4а). Отличия заключаются в значениях концентрации: для радиоактивных они вдвое меньше,

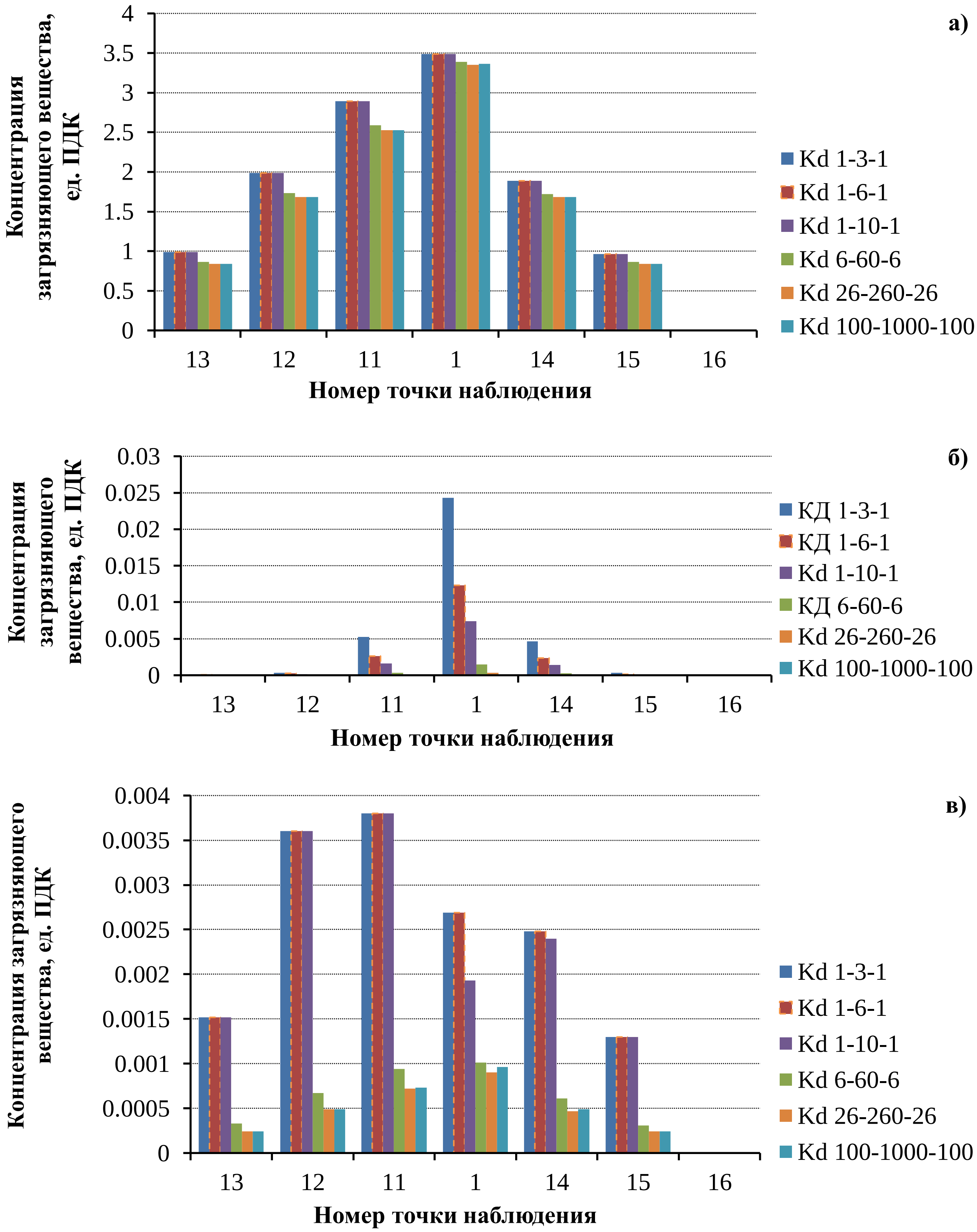


Рис. 5а, б, в. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез I с распадом: а) 30 лет, слой 1; б) 30 лет, слой 2, в) 300 лет, слой 1. **Fig. 5а, б, в.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section I: a) 30 years, layer 1 with decay; б) 30 years, layer 2 with decay; в) 300 years, layer 1 with decay.

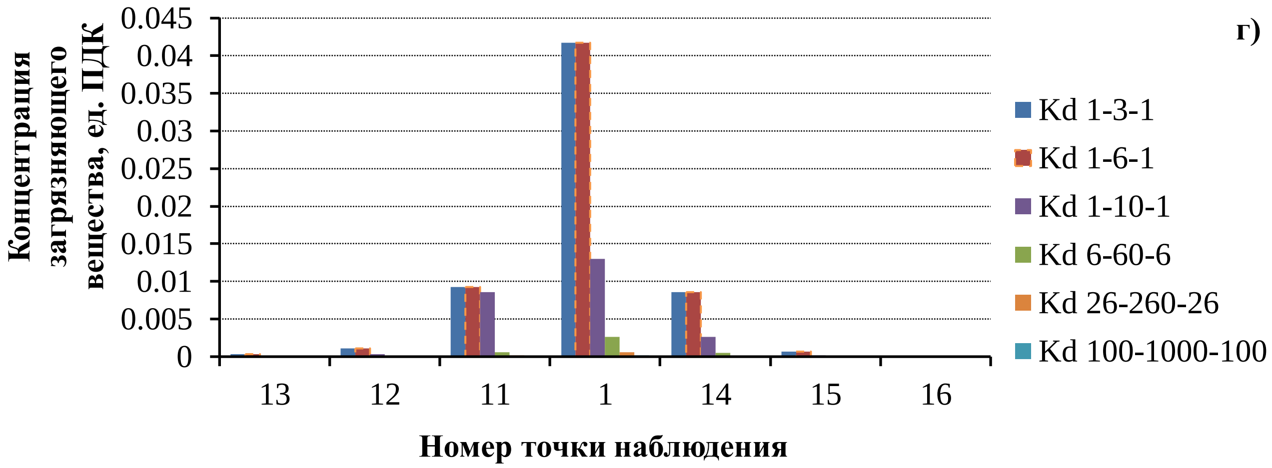
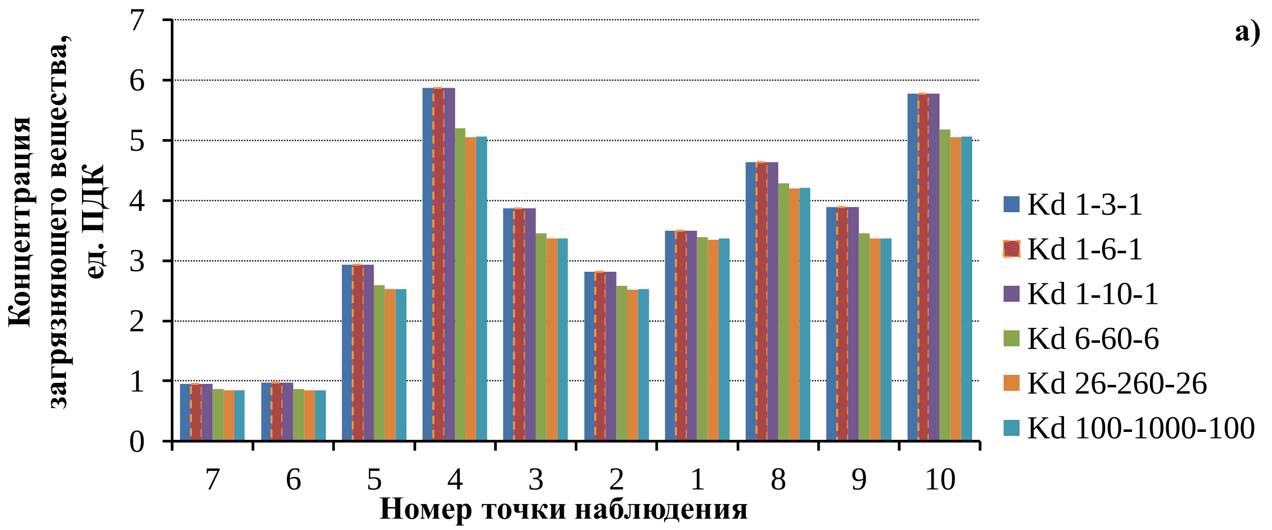


Рис. 5г. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез I с распадом: г) 300 лет, слой 2. **Fig. 5г.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section I: г) 300 years, layer 2 with decay.



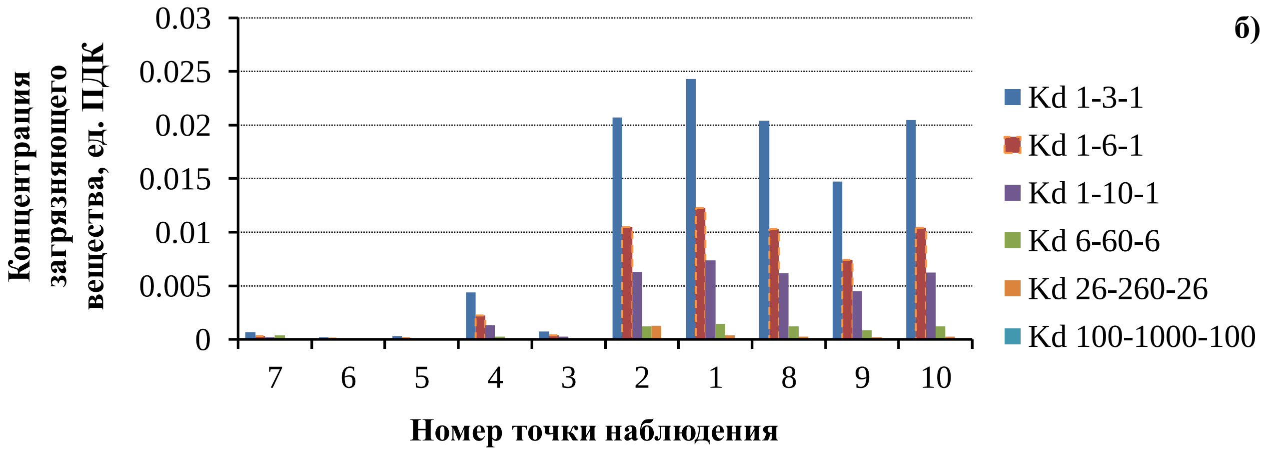


Рис. 6а, б. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез II с распадом: а) 30 лет, слой 1; б) 30 лет, слой 2. **Fig. 6а, б.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section II: a) 30 years, layer 1 with decay; б) 30 years, layer 2 with decay.

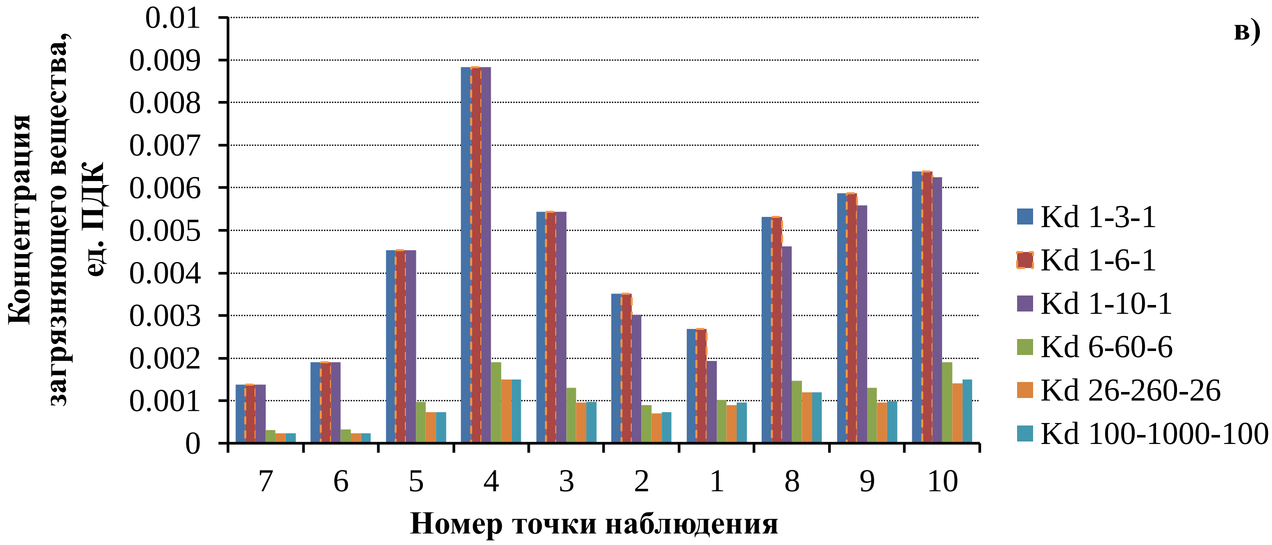


Рис. 6в. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез II с распадом: в) 300 лет, слой 1. **Fig. 6в.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section II: в) 300 years, layer 1 with decay.

например, в точке 4 – 12 ПДК (без распада) и порядка 6 ПДК (с распадом), и так – во всех точках, что определятся одним периодом полураспада радионуклидов. Кроме этого наблюдается смена максимумов ЗВ: без распада наибольшие концентрации имели ЗВ с большими Kd, а с распадом – с меньшими Kd, что связано с действием гидродисперсии потока подземных вод путем более интенсивного притока ЗВ с малыми Kd из соседних расчетных ячеек, чем ЗВ с высокими коэффициентами сорбции. Во ***втором слое – водоупоре*** (рис. 6б) наблюдаются накопление преимущественно слабо сорбируемых ЗВ, притекающих из первого слоя (до 0.025 ПДК) и следы сильно сорбирующихся ЗВ. ***Третий слой*** – нулевая концентрация ЗВ.

Через 300 лет после аварии (табл. 2; рис. 6в) в ***первом слое*** повторяются те же тенденции и изменения, что были отмечены для разреза I, только концентрации слабо сорбируемых ЗВ уменьшились с 12 ПДК в точке 1 до 0.009 ПДК, что определятся десятью периодами полураспада радионуклидов. Во ***втором слое – водоупоре*** (рис. 6г) также наблюдается незначительное увеличение всех слабо сорбируемых ЗВ по сценариям 1-3 –до 0.04 ПДК в точке 1 по сравнению с 0.024 ПДК после 30 лет (рис. 6б), также наблюдаются следы сильно сорбируемых ЗВ. ***Третий слой*** – нулевая концентрация ЗВ.

Изменение концентраций загрязняющих веществ в зависимости от их коэффициента сорбции

Сценарий (1-6-1). Разрез I-I. Распределение концентраций ЗВ **без распада** в ***первом слое*** в незначительной степени изменилось спустя 30 лет после аварии по отношению к исходной концентрации (рис. 7а). Например, в точке 1 при начальной 8 ПДК значение для этого срока изменилось до 7 ПДК, для 60 лет – чуть меньше – до 6 ПДК, для 100 лет – около 5 ПДК, для 300 лет – снизилось до 1.5 ПДК, причем, скачок в последний срок обусловлен в большей степени гидродисперсией потока. Концентрации ЗВ **с распадом** уменьшается во всех точках более чем вдвое (рис. 7а) за 30 лет, т.е. за один период полураспада радионуклидов и гидродисперсии потока подземных вод: если в точке 1 изначальная ПДК составляла 8, то после 30 лет она уменьшалась до 3.5 ПДК, а должна была до 4 ПДК, следовательно, уменьшение на 0.5 ПДК обусловлено гидродисперсией потока, т.е. перетеканием в соседние ячейки. Такая же тенденция наблюдается в других точках разреза, и за 300 лет сохраняются только незначительные следы ЗВ.

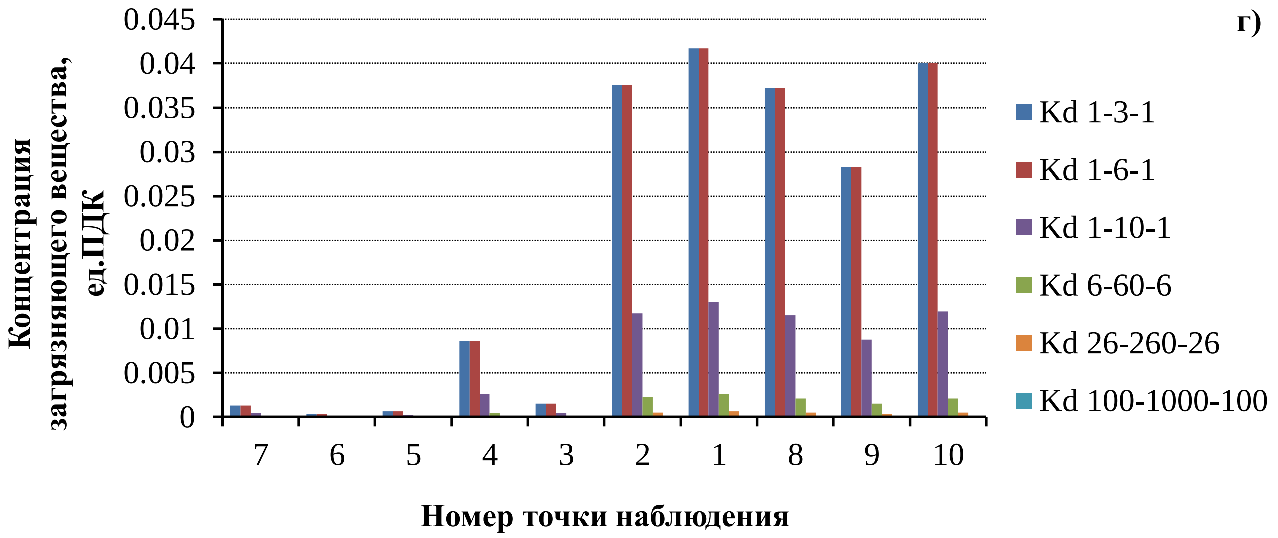
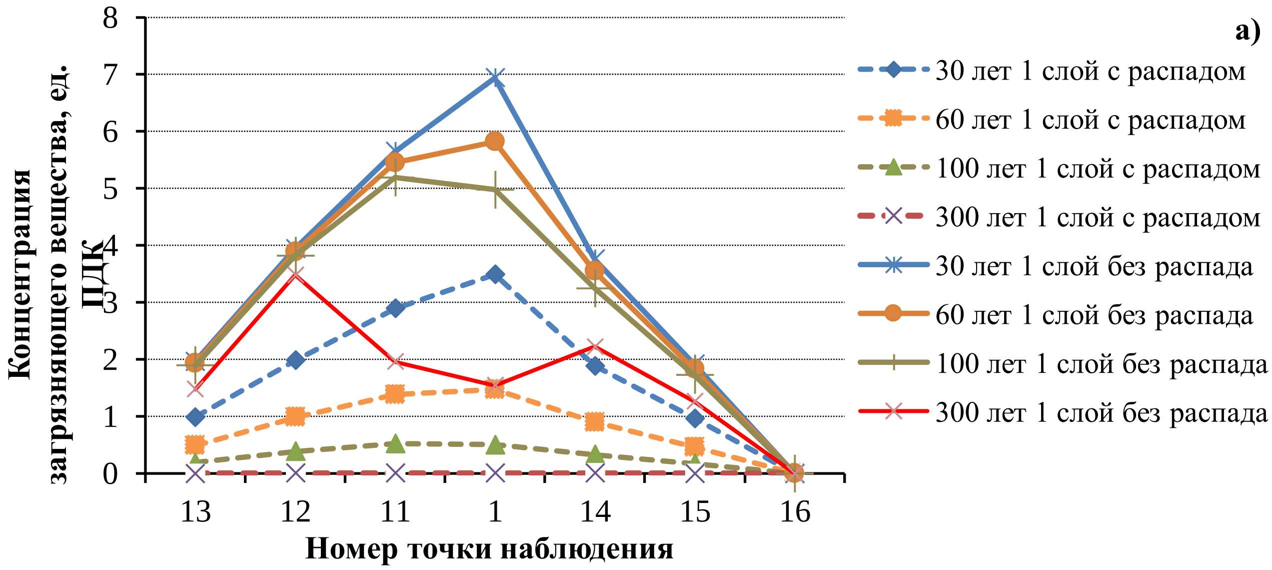


Рис. 6г. Распределение концентраций ЗВ для разных Kd, разрез II с распадом: г) 300 лет, слой 2. **Fig. 6г.** Distribution of pollutant concentrations for different Kd, section II: г) 300 years, layer 2 with decay.

Во ***втором слое – водоупоре*** (рис. 7б) **без распада** ЗВ наблюдаются практически только спустя 300 лет с 3.5 ПДК в точке 1, а в предыдущие сроки наблюдаются незначительные концентрации (табл. 1, 2). Концентрации **с распадом** (рис. 7в) очень незначительные: через 300 лет в точке 1 они составляют 0.042 ПДК, для более ранних сроков – от 0.012 до 0.02 ПДК, в остальных точках не превышают 0.005 ПДК, что практически означает наличие только следов ЗВ.

Разрез II-II. Распределение концентраций ЗВ (рис. 8а) **без распада** и **с распадом** в ***первом слое*** в значительной степени повторяет тенденции изменений, отмеченные в аналогичном слое разреза I (рис. 7а). Отличия отмечаются во ***втором слое*** (рис. 8б). Если в первом слое максимум концентраций на все расчетные сроки приходился на точку 4 (рис. 8а), то во втором он сместился в точку 2 (рис. 8б) за счет усиления гидродисперсии, т.е. перетекания из других ячеек. При этом максимальное количество ЗВ без распада во втором слое разреза II по отношению к аналогичному слою разреза I уменьшилось с 3.5 (рис. 7б) до 0.1 ПДК (рис. 8б), а количество ЗВ с распадом уменьшилось с 0.04 до 0.02 ПДК. Происходит увеличение, накопление ЗВ **с распадом** во времени: например, в точке 1 через 30 лет после аварии – 0.01 ПДК, а через 300 лет – 0.04 ПДК. ЗВ без распада тоже накапливаются: в точке 10 – от 0.04 ПДК через 30 лет до 0.11 ПДК через 300 лет. Следует отметить, что эти накопления малозначительны, т.е. это только следы.

Сценарий (1-10-1). Разрез I-I. Изменения концентраций ЗВ **с распадом** и **без распада** в ***первом слое*** (рис. 9) очень незначительны (табл. 1, 2) и повторяют изменения по сценарию (1-6-1), только в точке 11 на 300 лет значения без распада увеличиваются до 3.7 ПДК по сравнению с 2 ПДК в сценарии (1-6-1; рис. 7а), что связано с влиянием гидродисперсии потока за длительный вычислительный срок. Во втором слое наблюдается практически аналогичная ситуация, что и в первом.



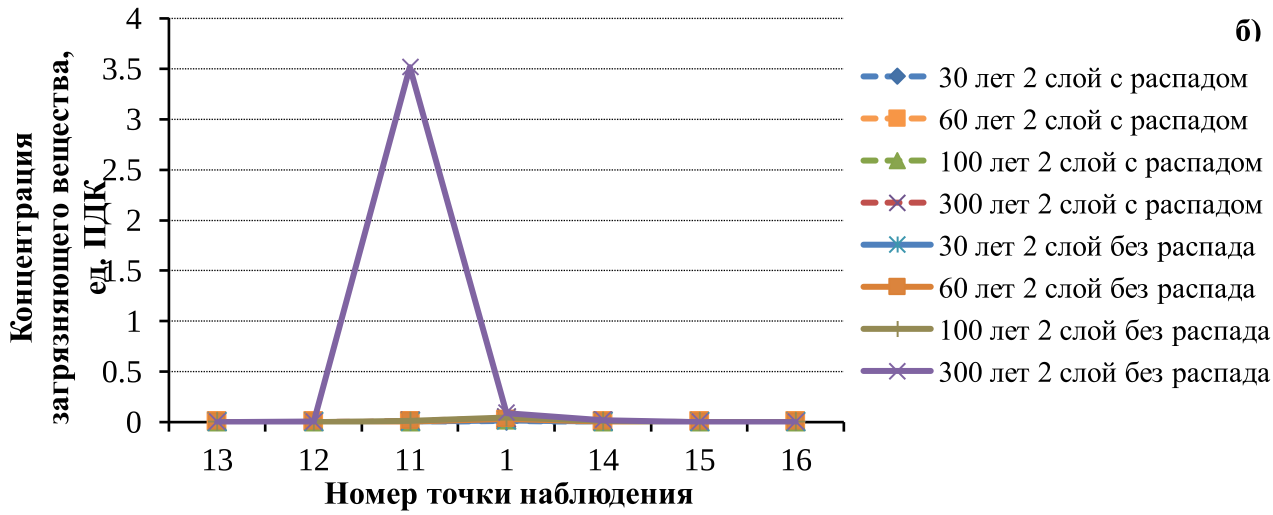


Рис. 7а, б. Сценарий Kd 1-6-1, распределение концентраций ЗВ по времени: а) разрез I; б) разрез I, слой 2, без распада. **Fig. 7а, б.** Scenario Kd 1-6-1, distribution of pollutant concentrations depending on time: а) section I; б) section I layer 2 without decay.

Разрез II-II. Изменения концентраций ЗВ **с распадом** и **без распада** в ***первом слое*** (рис. 10а) практически полностью незначительны (табл. 1, 2.) и повторяют изменения концентраций по сценарию (1-6-1), только в точке 9 за 60 лет значения без распада увеличиваются до 6.7 ПДК по сравнению с 4.2 ПДК в сценарии (1-6-1; рис. 7а), что связано с влиянием гидродисперсии потока. Во ***втором слое*** наблюдается практически аналогичная ситуация, что и в первом. Происходит увеличение и накопление ЗВ (рис. 10б) **с распадом** во времени: например, в точке 1 через 30 лет после аварии – 0.006 ПДК, а через 300 лет – 0.013 ПДК. ЗВ **без распада** тоже накапливаются: например, в точке 10 – от 0.008 ПДК через 30 лет до 0.065 ПДК через 300 лет.

Сравнивая данные с предыдущим сценарием, можно сказать, что в данном сценарии отмечается снижение накопления ЗВ за счет увеличения задерживающей силы проникновения ЗВ в водоупор. Например, в точке 10 за 300 лет по сценарию (1-6-1) накопилось 0.11 ПДК **без распада**, а по сценарию (1-10-1) – 0.065 ПДК; **с распадом** по сценарию (1-6-1) – 0.04 ПДК, по сценарию (1-10-1) – 0.012 ПДК.

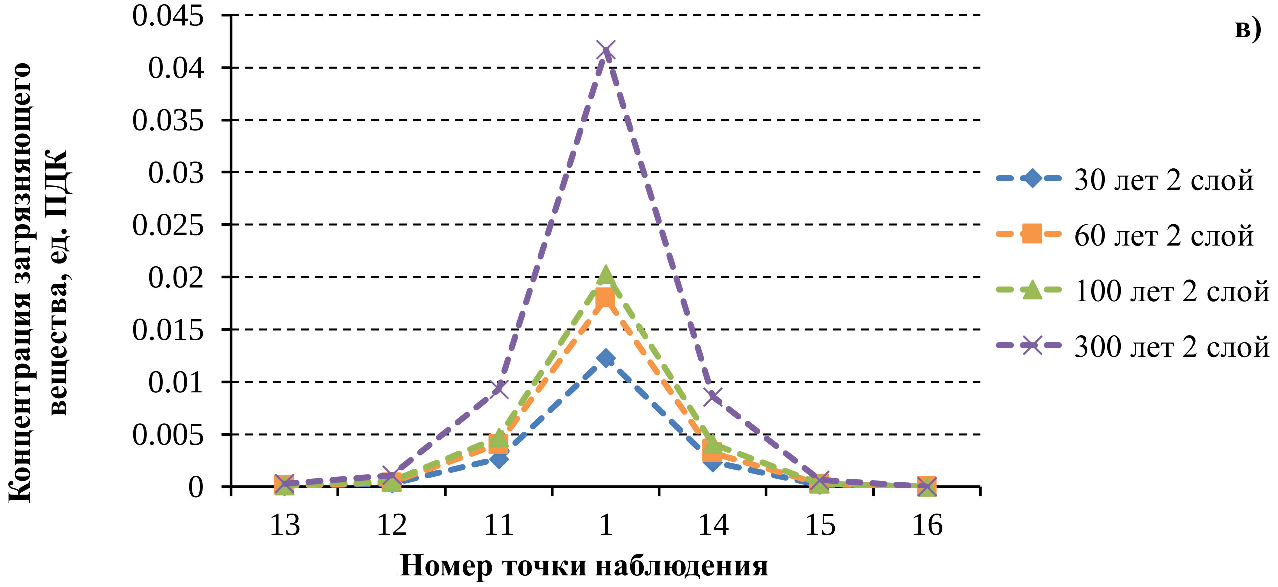


Рис. 7в. Сценарий Kd 1-6-1, распределение концентраций ЗВ по времени: в) разрез I, слой 2, с распадом. **Fig. 7в.** Scenario Kd 1-6-1, distribution of pollutant concentrations depending on time:) section I layer 2 with decay.

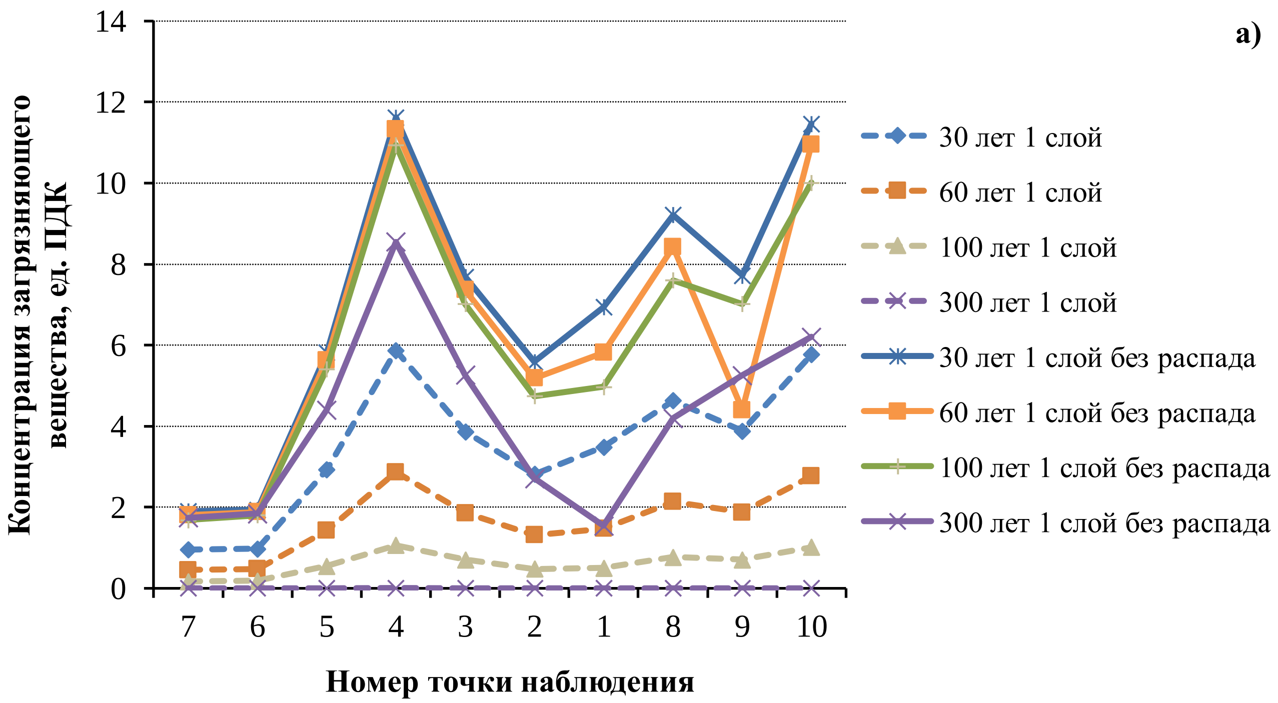


Рис. 8а. Сценарий Kd 1-6-1, распределение концентраций ЗВ по времени, разрез II: а) слой 1. **Fig. 8а.** Scenario Kd 1-6-1, distribution of pollutant concentrations depending on time: a) section II, layer 1.

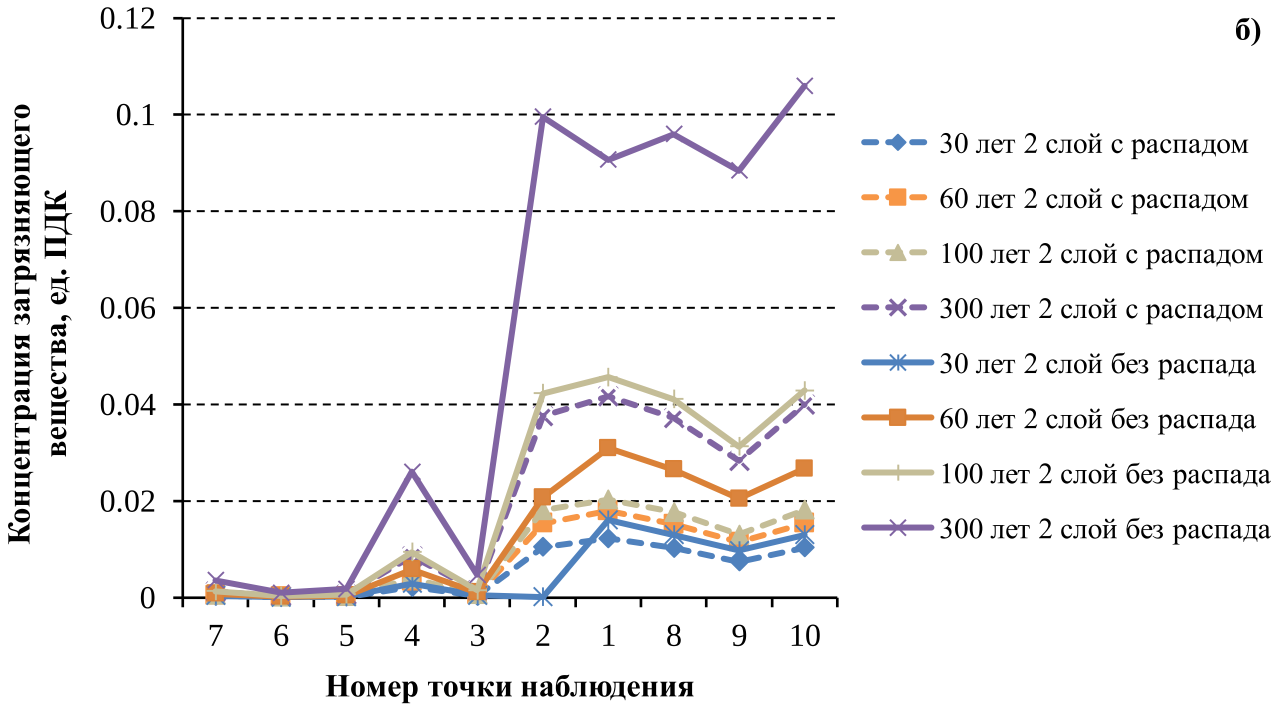


Рис. 8б. Сценарий Kd 1-6-1, распределение концентраций ЗВ по времени, разрез II: б) слой 2. **Fig. 8б.** Scenario Kd 1-6-1, distribution of pollutant concentrations depending on time: б) section II, layer 2.

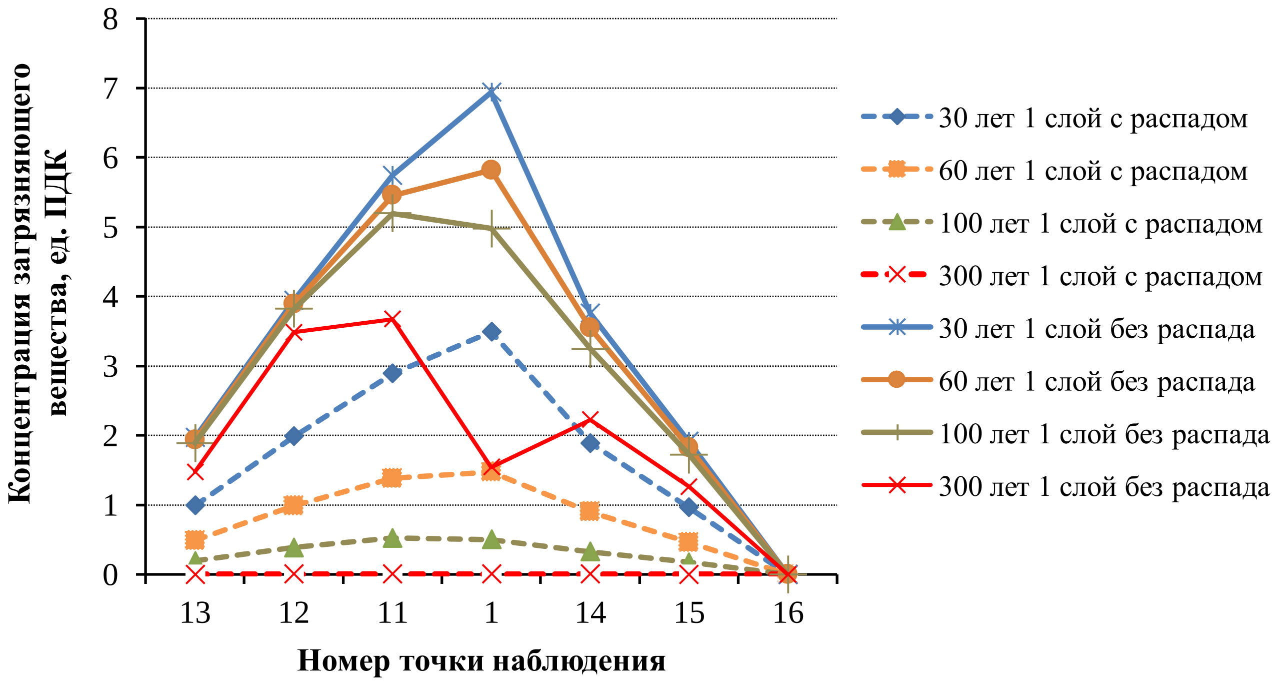
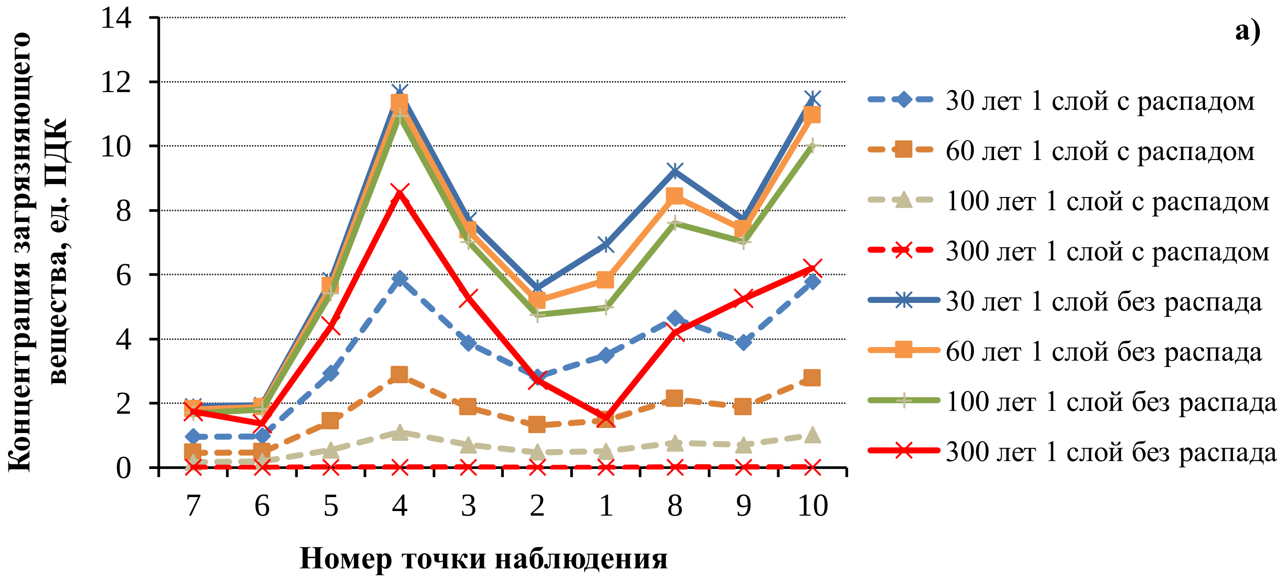


Рис. 9. Сценарий Kd 1-10-1, распределение концентраций ЗВ по времени, разрез I, слой 1. **Fig. 9.** Scenario Kd 1-10-1, distribution of pollutant concentrations depending on time, section I layer 1.



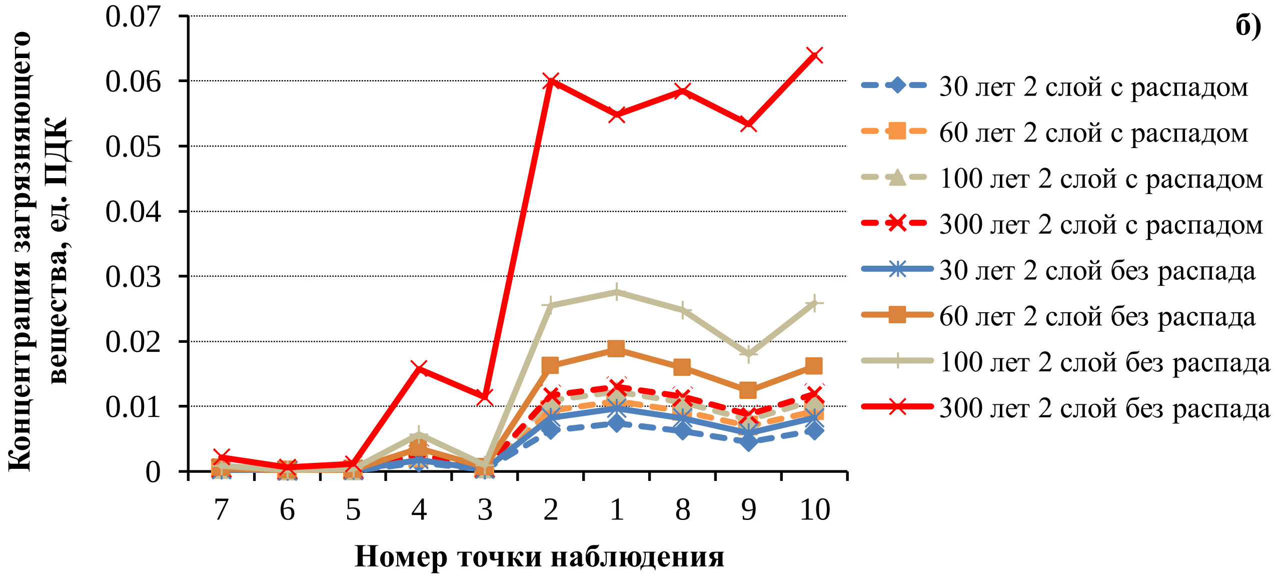


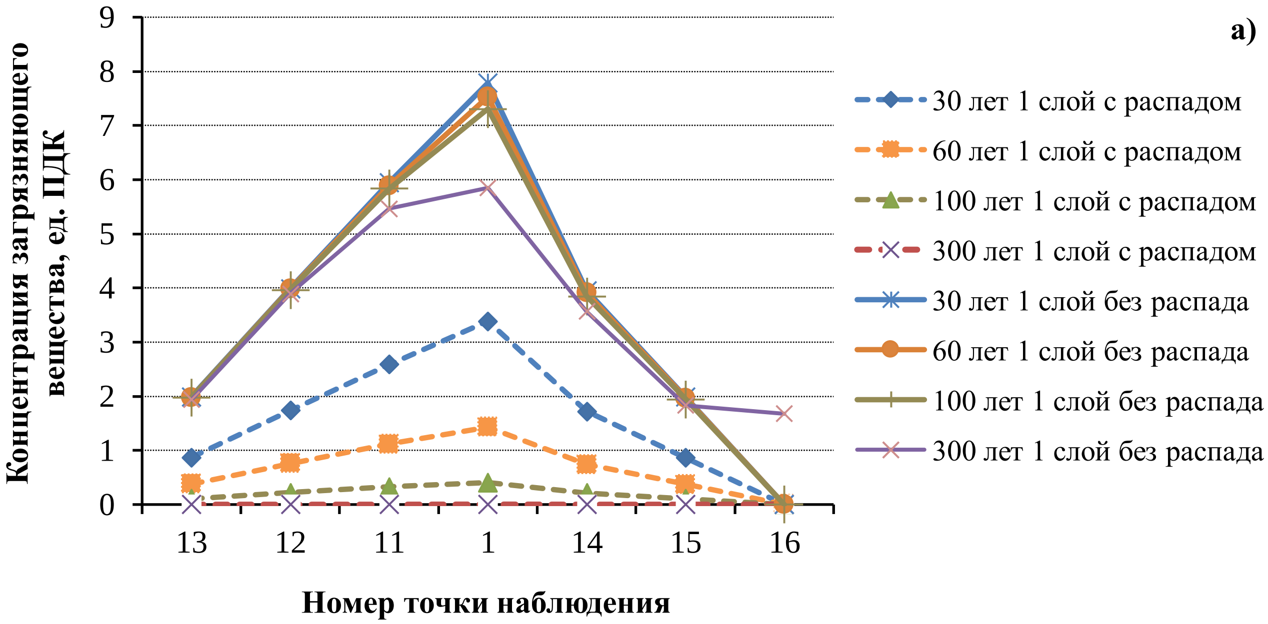
Рис. 10. Сценарий Kd 1-10-1, распределение концентраций ЗВ по времени, разрез II: а) слой 1, б) слой 2. **Fig. 10.** Scenario Kd 1-10-1, distribution of pollutant concentrations depending on time, section II: а) layer 1, б) layer 2.

Сценарий (6-60-6). Разрез I-I. В ***первом слое*** **без распада** (рис. 11а) наблюдается незначительное уменьшение концентрации ЗВ по сравнению с начальными концентрациями. Например, в точке 1 за 30 лет – 7.8 ПДК при начальной 8 ПДК, **с распадом** – 3.5 ПДК (роль распада). Это свидетельствует о значительной задержки ЗВ в первом слое за счет увеличения процесса сорбции при больших Kd как в первом, так и втором (водоупоре) слоях.

Во ***втором слое*** (рис. 11б) отмечается уменьшение концентраций ЗВ. Например, ПДК в точке 1 **без распада** за 300 лет составляет 0.016, а в сценарии (1-6-1; рис. 7б) – 3.5 ПДК, **с распадом** – 0.0025 ПДК и 0.042 ПДК при сценарии (1-6-1; рис. 7в).

Разрез II-II. В ***первом слое*** **без распада** (рис. 12а), как и в разрезе I, наблюдается незначительное уменьшение концентрации ЗВ по сравнению с начальными концентрациями на все расчетные сроки. Например, в точке 12 за 30 лет – 11.8 ПДК при начальной 12 ПДК,

с распадом – 5.5 ПДК (роль распада). Это свидетельствует о значительной задержки ЗВ в первом слое за счет увеличения роли процесса сорбции при больших Kd в обоих слоях. Во ***втором слое*** (рис. 12б) отмечается уменьшение концентраций ЗВ: например, в точке 1 **без распада** за 300 лет – 0.016 ПДК, а в сценарии (1-6-1; рис. 7б) – 3.5 ПДК, **с распадом** – 0.0015 ПДК и 0.042 ПДК при сценарии (1-6-1; рис. 7в). В целом соблюдаются тенденции изменения концентраций ЗВ, аналогичные сценарию (1-6-1), только в точке 1 концентрация **без распада** сделала скачок до 0.009 ПДК за 60 лет после аварии. Здесь проявляется влияние гидродисперсии потока подземных вод в области их питания (рис. 2).



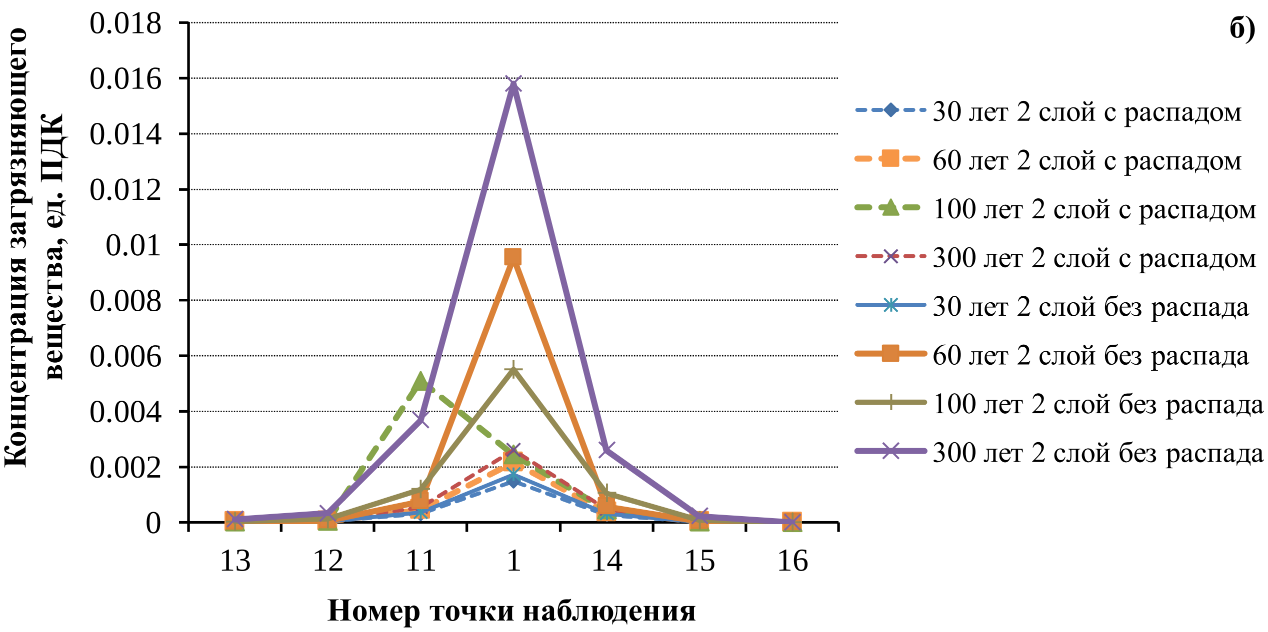


Рис. 11. Сценарий Kd 6-60-6, распределение концентраций ЗВ по времени, разрез I: а) слой 1, б) слой 2. **Fig. 11.** Scenario Kd 6-60-6 Distribution of pollutant concentrations depending on time, section I: а) layer 1, б) layer 2.

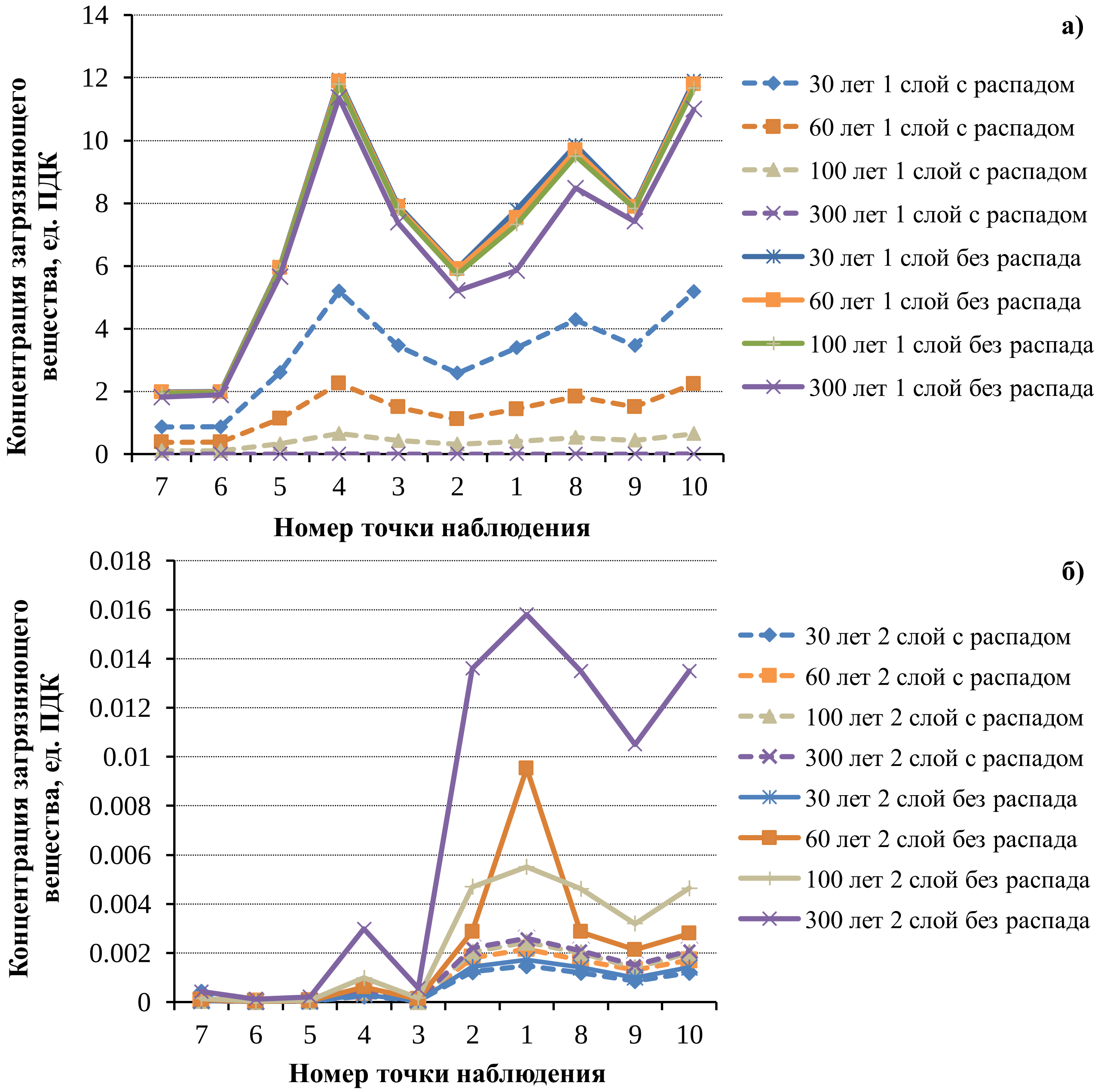


Рис. 12. Сценарий Kd 6-60-6, распределение концентраций ЗВ по времени, разрез II: а) слой 1, б) слой 2. **Fig. 12.** Scenario Kd 6-60-6, distribution of pollutant concentrations depending on time, section II: a) layer 1, б) layer 2.

Дальнейшее рассмотрение результатов моделирования по сценариям (26-260-26) и (100-1000-100) не имеет смысла, т.к. все ЗВ концентрируются в первом слое, а во втором (водоупоре) практически обнуляются (табл. 1, 2), что свидетельствует о полной непроницаемости водоупора в пределах рассматриваемых разрезов.

Обсуждение результатов площадного моделирования

Результаты площадного моделирования процессов миграции ЗВ на исследуемой территории представлены на рисунке 13. Моделирование проводилось по двум сценариям:

(1-3-1) для слабо сорбируемых ЗВ и (100-1000-100) для сильно сорбируемых, без распада и с распадом, по первому слою – грунтовые воды, по второму слою – водоупор, на два расчетных срока – 30 и 300 лет.

За начальное загрязнение грунтовых вод в условиях данного численного эксперимента было принято поверхностное загрязнение радионуклидом ^{137}Cs юга Калужской области после аварии на ЧАЭС. Как видно на рисунке 1, конфигурация загрязнения представляет собой два обособленных участка – западный и восточный – на территории радиоактивного следа, где концентрации радионуклида превышают ПДК более чем в 10 раз.

Миграция слабо сорбируемых ЗВ по сценарию 1-3-1 без распада на всей изучаемой территории (рис. 13.1). **Через 30 лет** в ***первом слое*** (А) конфигурации площадного загрязнения сохраняется, максимальное загрязнение уменьшается до 9 ПДК; во ***втором слое*** (Б) она сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на восточном участке, а его степень уменьшается до 0.045 ПДК.

Через 300 лет в ***первом слое*** (В) конфигурации площадного загрязнения значительно изменяется, в большей степени сохраняется западный участок, максимальное загрязнение уменьшается до 7 ПДК; во ***втором слое*** (Г) она сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на восточном участке, а его степень увеличивается по сравнению с концентрацией за 30 лет – до 0.8 ПДК.

Миграция сильно сорбируемых ЗВ по сценарию 100-1000-100 без распада (рис. 13.2). **Через 30 лет** в ***первом слое*** (А) конфигурации площадного загрязнения практически отвечает начальному загрязнению (рис. 1), максимальное загрязнение превышает 10 ПДК; во ***втором слое*** (Б) конфигурация сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на незначительной территории на восточном участке, а его степень уменьшается до 0.0003 ПДК.

Через 300 лет в ***первом слое*** (В) конфигурации площадного загрязнения мало изменяется, максимальное загрязнение уменьшается до 9 ПДК; во ***втором слое*** (Г) она сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на восточном участке, а его степень увеличивается по сравнению с концентрацией за 30 лет до 0.04 ПДК.

Миграция сильно сорбируемых ЗВ по сценарию 1-3-1 с распадом (рис. 13.3). **Через 30 лет** в ***первом слое*** (А) конфигурации площадного загрязнения сохраняется, но максимальное загрязнение уменьшается до 4.5 ПДК; во ***втором слое*** (Б) конфигурация сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на восточном участке, а его степень уменьшается до 0.02 ПДК.

Через 300 лет в ***первом слое*** (В) конфигурация площадного загрязнения значительно изменяется, незначительное загрязнение в виде ограниченного участка держится на восточном участке до 0.02 на фоне 0.004 ПДК. Во ***втором слое*** (Г) она сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на восточном участке, а его площадь уменьшается по сравнению с площадью за 30 лет, ПДК увеличивается до 0.04.

Миграция сильно сорбируемых ЗВ по сценарию 100-1000-100 с распадом (рис. 13.4). **Через 30 лет** в ***первом слое*** (А) конфигурации площадного загрязнения практически отвечает начальному загрязнению (рис. 1), но максимальное загрязнение превышает 3.6 ПДК; во ***втором слое*** (Б) конфигурация сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на незначительной территории восточного участка, а его степень уменьшается до 0.0003 ПДК.

Через 300 лет в ***первом слое*** (В) конфигурация площадного загрязнения мало изменяется, максимальное загрязнение уменьшается до 0.0009 ПДК; во ***втором слое*** (Г) она сильно изменяется, загрязнение появляется в основном на восточном участке, а его степень уменьшается до 0.0004 ПДК.

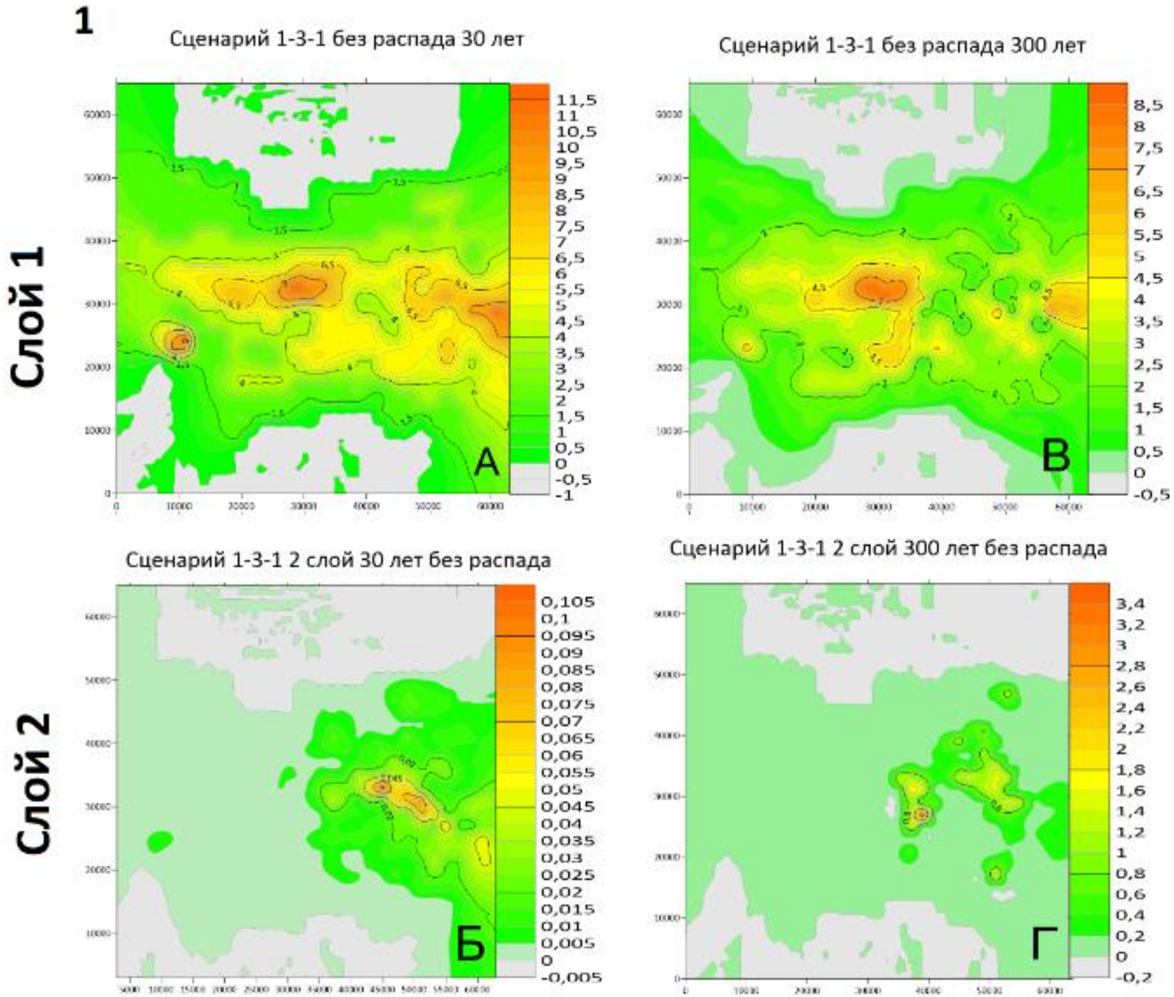


Рис. 13.1. Картосхема распределения концентраций слабо сорбируемого (сценарий 1-3-1) и сильно сорбируемого (100-1000-100) ЗВ на моделируемом участке с распадом и без распада. **Fig. 13.1.** Cartographic chart of the distribution of concentrations of weakly sorbed (Scenario 1-3-1) and strongly sorbed (Scenario 100-1000-100) pollutants in the simulated area with/without decay.

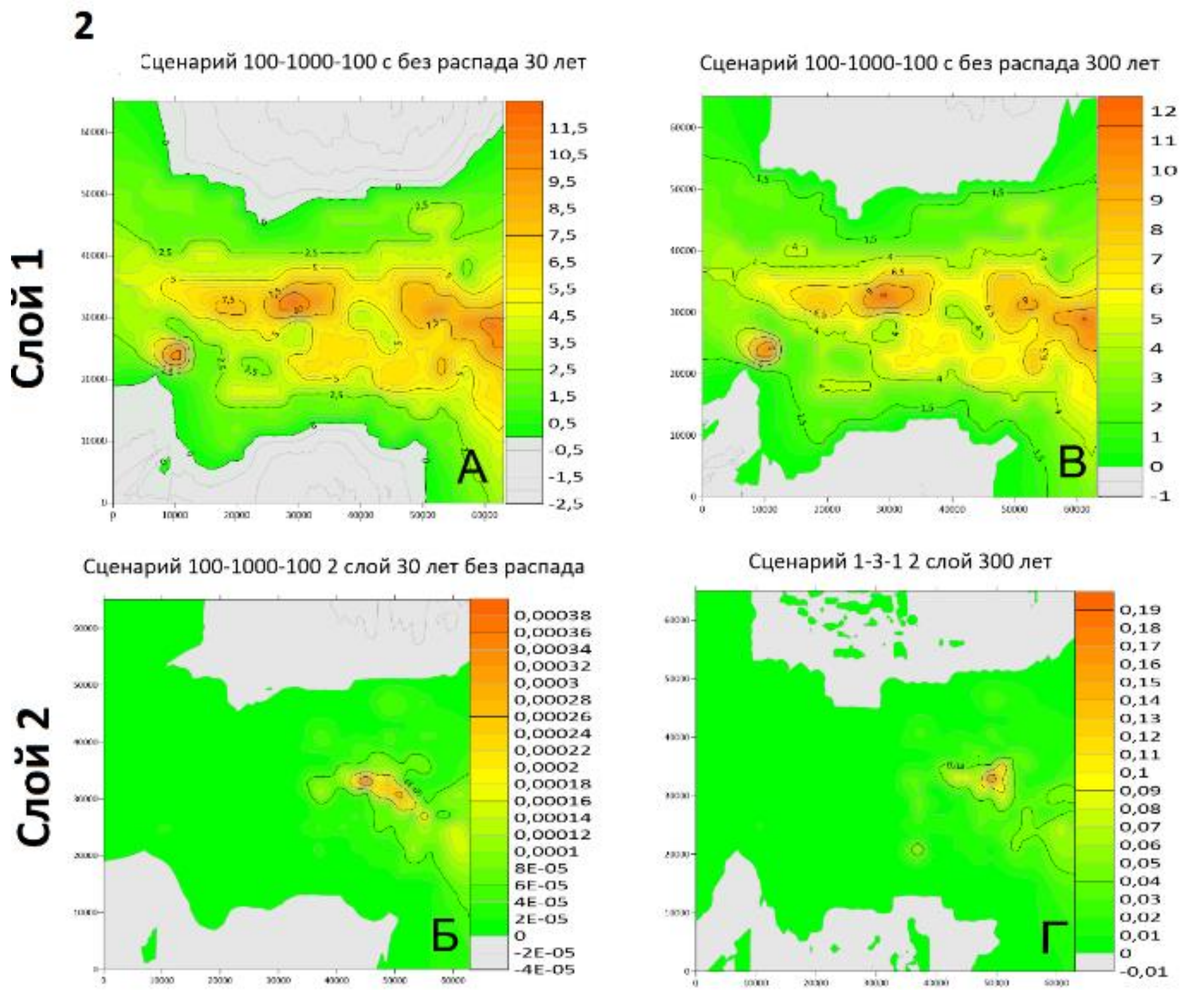


Рис. 13.2. Картосхема распределения концентраций слабо сорбируемого (сценарий 1-3-1) и сильно сорбируемого (100-1000-100) ЗВ на моделируемом участке с распадом и без распада. **Fig. 13.2.** Cartographic chart of the distribution of concentrations of weakly sorbed (Scenario 1-3-1) and strongly sorbed (Scenario 100-1000-100) pollutants in the simulated area with/without decay.

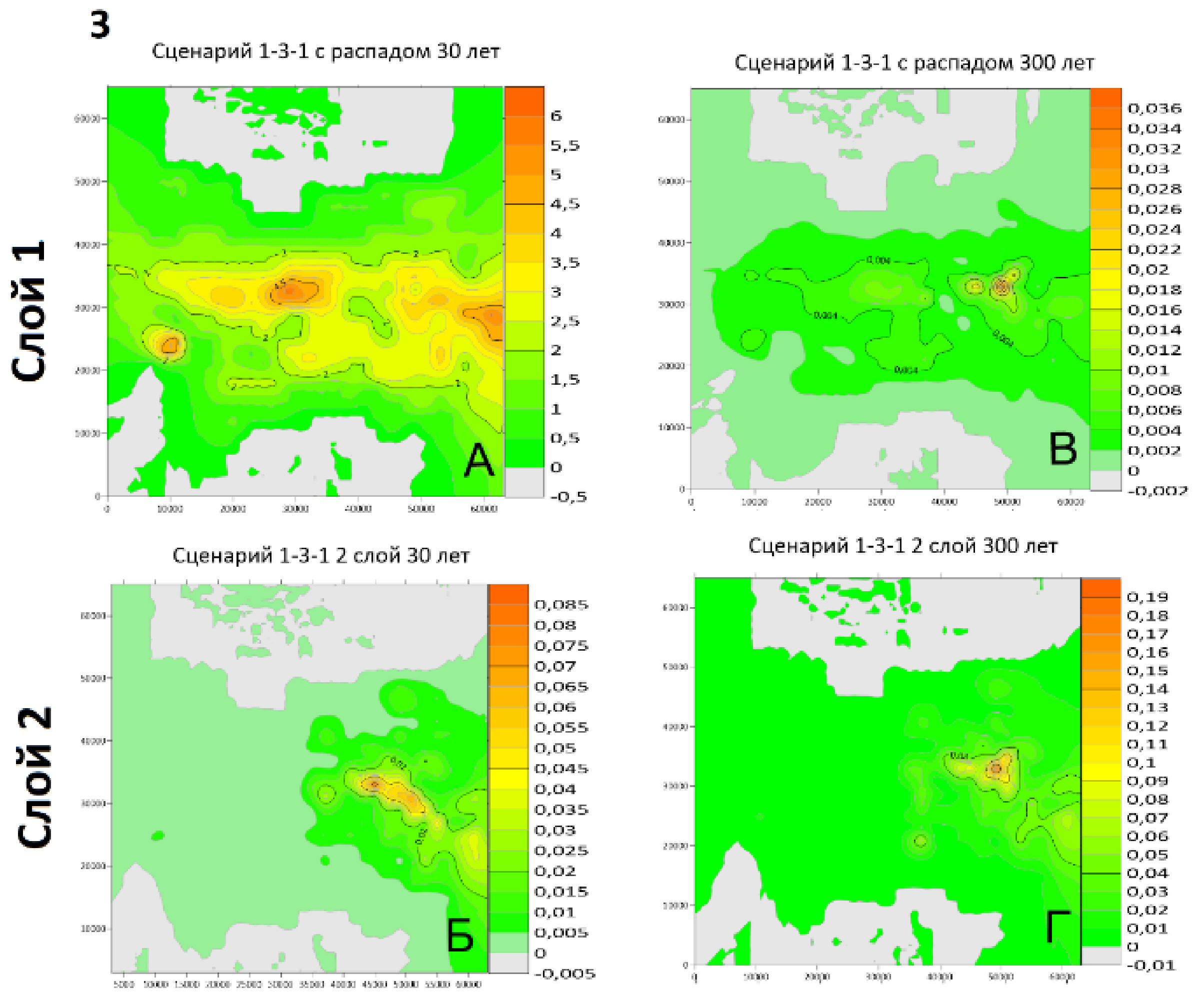


Рис. 13.3. Картосхема распределения концентраций слабо сорбируемого (сценарий 1-3-1) и сильно сорбируемого (100-1000-100) ЗВ на моделируемом участке с распадом и без распада. **Fig. 13.3.** Cartographic chart of the distribution of concentrations of weakly sorbed (Scenario 1-3-1) and strongly sorbed (Scenario 100-1000-100) pollutants in the simulated area with/without decay.

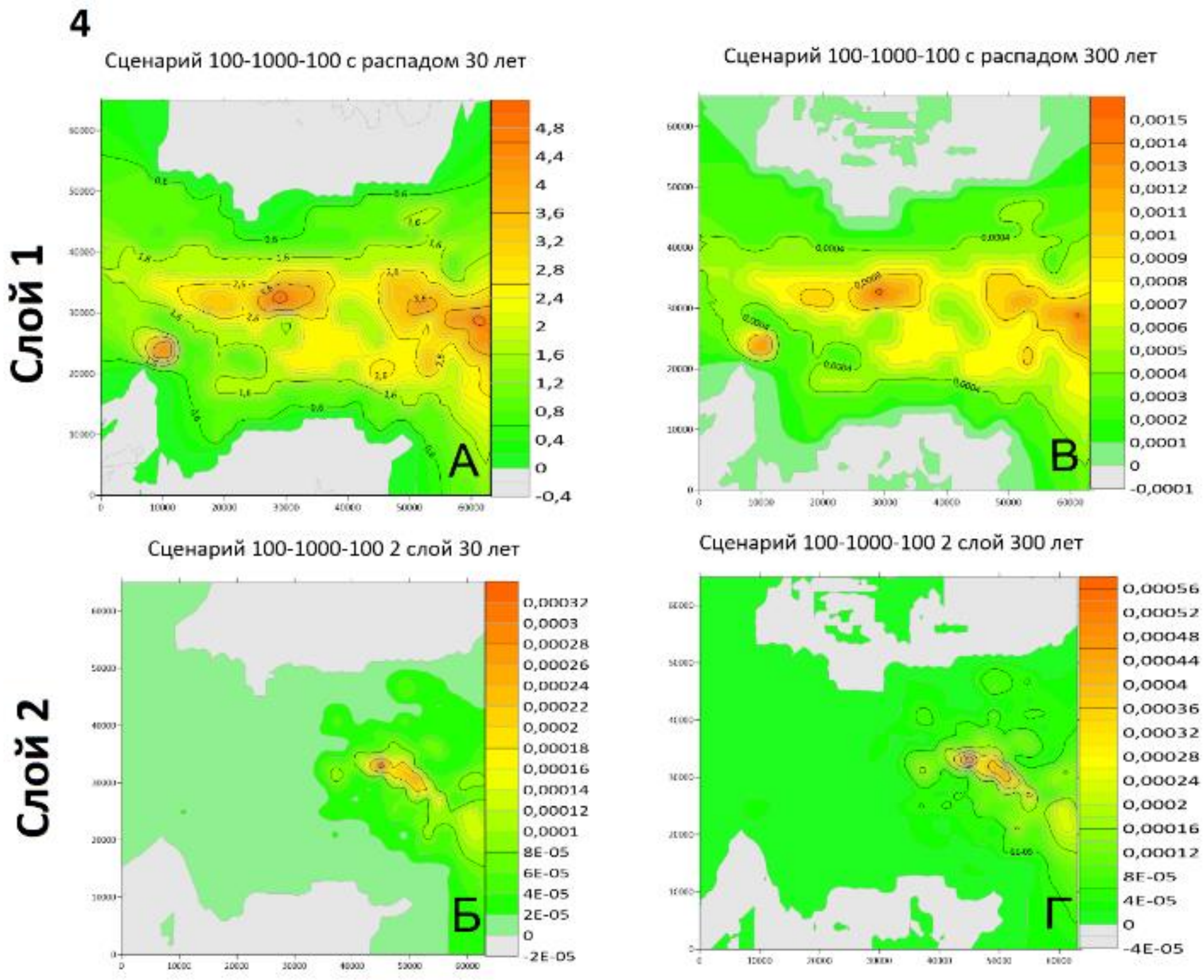


Рис. 13.4. Картосхема распределения концентраций слабо сорбируемого (сценарий 1-3-1) и сильно сорбируемого (100-1000-100) ЗВ на моделируемом участке с распадом и без распада. **Fig. 1.4.** Cartographic chart of the distribution of concentrations of weakly sorbed (Scenario 1-3-1) and strongly sorbed (Scenario 100-1000-100) pollutants in the simulated area with/without decay.

Таким образом, слабо сорбируемые ЗВ ***без распада*** через 300 лет сохраняются на западном участке в первом слое, а ЗВ восточного участка в большей степени мигрируют и задерживаются ***во втором слое – водоупоре*** в незначительных количествах.

Сильно сорбируемые ЗВ ***без распада*** через 300 лет сохраняются на обоих участках в первом слое, причем концентрация их незначительно отличается от 30-летнего периода, а во втором слое они занимают незначительную площадь восточного участка в незначительных концентрациях.

Слабо сорбируемые ЗВ ***с распадом*** через 300 лет практически не сохраняются на всей площади исследуемой территории, а встречаются в виде незначительных следов на восточном участке в первом слое, а во втором слое на восточном участке отмечается незначительная площадь с ЗВ в незначительных количествах.

Сильно сорбируемые ЗВ ***с распадом*** через 300 лет сохраняются на обоих участках в первом слое, причем концентрация их значительно отличается от 30-летнего периода, уменьшаясь до 0.0009 ПДК, что соответствует очень незначительным величинам – следам, а во втором слое ЗВ занимают незначительную площадь восточного участка в незначительных концентрациях.

Это свидетельствует о том, что радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr за 10 периодов полураспада полностью распадаются.

Сравнение результатов данного этапа исследований с предыдущим этапом исследований

Рассмотрим особенности миграции ЗВ через проницаемый водоупор, ранее нами изученные (Белоусова, Руденко, 2021а, 2021б), и особенности миграции ЗВ, проведенные на данном этапе исследований. Результаты моделирования ранее проведенных и настоящих исследований приведены на 3D картах (рис. 14).

При исследовании с проницаемым водоупором Kd (рис. 14А) задавались равными для всех трех слоев (6-6-6), с непроницаемым Kd (рис. 14Б) задавалось больше чем в подземных водах первого и третьего слоя (1-3-1).

При *проницаемом водоупоре* (рис. 14А) миграция ЗВ *без распада* за 300 лет происходит во всех трех слоях. В первом слое (грунтовые воды) концентрация не превышает 4 ПДК, во втором слое происходит довольно интенсивное накопление с концентрацией до 4 ПДК, в третьем слое (напорные воды) происходит накопление загрязнения вод на отдельных участках с ЗВ до 2 ПДК.

При *непроницаемом водоупоре* (рис. 14Б) *без распада* за 300 лет интенсивность миграции ЗВ сильно изменяется во всех слоях. В первом слое происходит накопление значительных концентраций более 5 ПДК, во втором процесс значительно обособляется и уменьшается по площади, а ПДК уменьшается до 3, в третьем слое имеет ограниченное распространение в незначительных концентрациях до 0.05 ПДК. Следует отметить, что на рассмотренных нами разрезах ни в одной из точек в третьем слое миграция ЗВ практически не наблюдается.

Выводы

Объектом исследований является часть территории Калужской области наиболее пострадавшая от аварии на Чернобыльской атомной станции.

Экспериментальных данных о процессах миграции радионуклидов и их параметрах в насыщенной зоне – подземных водах практически нет, слабая изученность отмечается только в некоторых районах в зоне радиоактивного следа от аварии на ЧАЭС на территории Брянской области и они в большей степени относятся к ненасыщенной, защитной зоне.

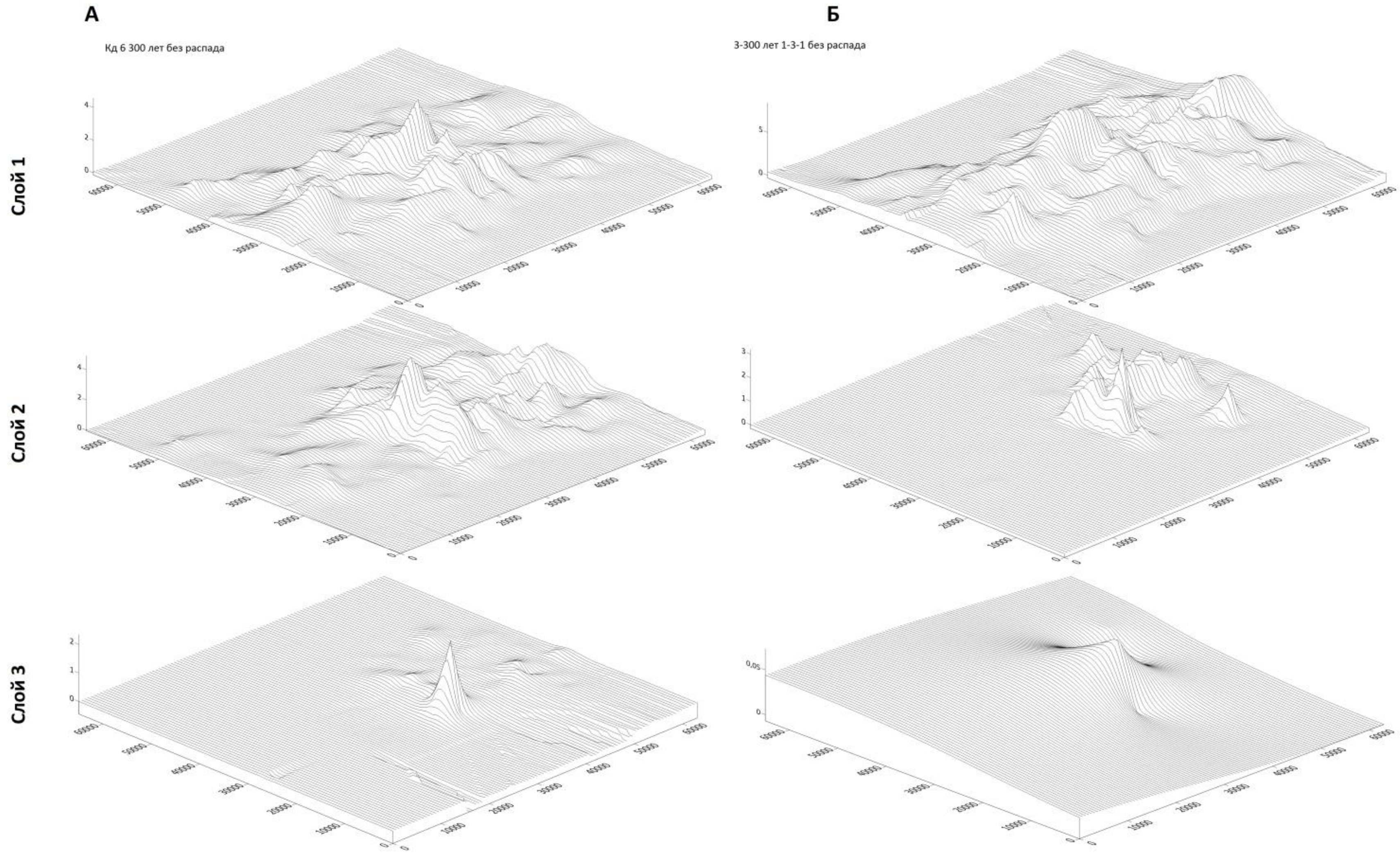


Рис. 14. Сравнение сценариев с проницаемым (А) и непроницаемым (Б) водоупорами.
Fig. 14. Comparison of scenarios with permeable (A) and impermeable (B) aquiclude.

Поэтому нами были выбраны не полевые или лабораторные пути исследований, а численные экспериментальные исследования, т.е. численные эксперименты, на изучаемой территории Калужской области в зоне радиоактивного следа.

Численные эксперименты направлены на изучение миграции ЗВ в насыщенной зоне – из грунтовых вод через водоупор в напорные подземные воды. При этом рассматривались не только радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr, но и другие ЗВ, от слабо до сильно сорбируемых, которые наблюдаются в напорных водах изучаемого объекта.

Для моделирования процесса массопереноса в подземных водах была выбрана модель MT3D, которая работает на основе транспортной модели MODFLOW. Наряду с процессами гидродисперсии потоков она позволяет учитывать сорбцию ЗВ и радиоактивный распад.

Учитывая, что степень геологической, гидрогеологической и гидрогеохимической изученности выбранного нами объекта не позволяет обеспечить достаточную достоверность прогнозов, что особенно касается водоупоров, исследование было осуществлено в два этапа. Результаты первого этапа, миграция ЗВ через проницаемый водоупор, приведены в наших предыдущих работах (Белоусова, Руденко, 2021а, 2021б), а результаты второго этапа, миграция ЗВ через непроницаемый водоупор, приведены в данной статье.

Численные эксперименты второго этапа проводилось по следующим сценариям: 1 – (1-3-1), 2 – (1-6-1), 3 – (1-10-1), 4 – (6-60-6), 5 – (26-260-26), 6 – (100-1000-100), где первая цифра – значение Kd (л/кг) в первом слое, вторая – значение Kd во втором слое и третья – значение Kd в третьем слое. Такой подбор коэффициентов распределения обусловлен заданием их значений на порядок больше в водоупоре, чем в верхнем и нижнем водоносных горизонтах. Каждый сценарий проводился для двух условий: с радиоактивным распадом и без него.

За начальные условия была принята степень загрязнения грунтовых вод по аналогии со степенью загрязнения поверхности земли в зоне радиоактивного следа на изучаемой территории, хотя, в природных условиях на этой территории в грунтовых водах такого распространения загрязнения ни радионуклидами, ни другими ЗВ не наблюдается. Концентрации ЗВ могут быть заданы в г/л, ПДК, фоновых концентрациях, в нашем случае использовались ПДК. Коэффициенты распределения сорбции (Kd) различных ЗВ подбирались из известных значений для территорий Брянской области (Белоусова, Руденко, 2021а, 2021б), для радионуклидов значения Kd в основном относятся к ненасыщенной зоне.

Анализ результатов моделирования в рамках численных экспериментов проводился для двух разрезов и в целом по изучаемому объекту по картам.

Установлено, что по мере увеличения Kd в грунтовых водах сохраняется наибольшее количество ЗВ, а вещества с минимальными Kd (слабо сорбируемые) частично оседают в водоупоре. Следует отметить, что в третьем слое (в напорных водах) ЗВ в точках разрезов не обнаружены, хотя в других точках они появляются (о чем будет сказано ниже).

По значениям Kd установлено, что при Kd более 60 л/кг ЗВ в водоупор не проникают, т.е. водоупор практически «абсолютно» не проницаемый. Для радионуклидов главную роль в процессе миграции играет радиоактивный распад, когда в первые 30 лет после аварии на ЧАЭС концентрация радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr уменьшилась вдвое, т.к. этот срок соответствует их периоду полураспада, а в дальнейшие 300 лет они полностью распадутся. Для нерадиоактивных ЗВ процесс происходит иначе: они будут накапливаться в водоупорной толще и проникать в напорные воды, что в значительной мере ухудшает экологическую ситуацию, ходя другие долгоживущие радионуклиды (например, плутоний-209) имеют период полураспада 24095 лет и будут представлять очень серьезную опасность там, где после аварии выпали фрагменты ядерного топлива (т.е. в районе самой ЧАЭС).

Главными факторами формирования процессов миграции ЗВ являются в первую очередь их радиоактивный распад, во вторую – их сорбционные свойства, а в третью –

гидродисперсия потоков подземных вод, которая в свою очередь зависит от геолого-гидрогеологических условий изучаемой территории.

Сравнение результатов 2 этапов исследований. При *проницаемом водоупоре* миграция ЗВ без распада за 300 лет происходит во всех трех слоях. При *непроницаемом водоупоре* без распада за 300 лет интенсивность миграции сильно изменяется во всех слоях: в первом происходит накопление значительных концентраций, во втором – процесс значительно обособляется и уменьшается по площади и концентрации, а в третьем – имеет ограниченное распространение.

Рассматривая два варианта водоупоров, можно сказать, что в природных условиях ни тот, ни другой практически не могут существовать отдельно, т.к. обычно водоупорные толщи состоят из различных участков, имеющих как непроницаемые, так и проницаемые водоупоры, представляющие в некотором смысле лоскутное одеяло. Водоупоры не могут быть непроницаемыми на всем своем протяжении, т.к. в их составе есть природные нарушения (линзы, прослои проницаемых пород, неотектонические трещины) и техногенные нарушения (скважины, колодцы).

Из этого следует сделать следующий вывод: для изучения процессов миграции ЗВ и прогнозирования их дальнейшего развития в сложных гидрогеологических условиях необходимо детальное изучение геологического и гидрогеологического строения, а также гидрогеохимических условий изучаемых объектов и проведение экспериментальных исследований массопереноса с целью параметризации всех процессов, обусловливающих его, для последующего численного моделирования и прогнозирования развития реальной экологической ситуации на объектах исследований.

Благодарности. Авторы выражают благодарность безвременно ушедшей сотруднице Миняевой Ю.В. за подготовку материалов к данной статье.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем РАН: тема № FMWZ-2022-0002 «Исследования геоэкологических процессов в гидрологических системах суши, формирования качества поверхностных и подземных вод, проблем управления водными ресурсами и водопользованием в условиях изменений климата и антропогенных воздействий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов К.А., Кирьякова Е.А., Руденко Е.Э.* 2013. Моделирование процесса геофильтрации на участке Калужской области (в зоне радиоактивного следа) // Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность: VII международная конференция молодых ученых и талантливых студентов, 11-13 декабря 2013 г. М.: ИВП РАН. С. 121-125.
2. *Белоусова А.П.* 2015. Оценка опасности загрязнения подземных вод как компонента окружающей среды // Вода: химия и экология. № 12. С. 31-40.

REFERENCES

1. Antonov KA, Kiryakova EA, Rudenko EE. Modeling the process of geofiltration in the Kaluga region (in the zone of the radioactive trace) [*Modelirovaniye protsessa geofil'tratsii na uchastke Kaluzhskoy oblasti (v zone radioaktivnogo sleda)*] *Water resources, ecology and hydrological safety [Vodnyye resursy, ekologiya i gidrologicheskaya bezopasnost'] VII international conference of young scientists and talented students,* December 11-13, 2013 *[VII mezhdunarodnaya konferentsiya molodykh uchenykh i talantlivykh studentov].* Moscow: IVP RAN, 2013:121-125.
2. Belousova AP. Assessment of the risk of groundwater pollution as a component of the environment [Otsenka opasnosti zagryazneniya podzemnykh vod kak komponenta okruzhayushchey

3. *Белоусова А.П., Руденко Е.Э.* 2019. Эколого-гидрогеологические исследования на территориях европейской части России, пострадавших от аварии на ЧАЭС // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. Производственно-технический журнал. № 4 (136). С. 38-56.
4. *Белоусова А.П., Руденко Е.Э.* 2020. Трансформация уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению в зоне Чернобыльского следа на территории Калужской области // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 1. С. 18-103.
5. *Белоусова А.П., Руденко Е.Э.* 2021a. Моделирование процессов перетекания загрязненных грунтовых вод в напорные в лесных экосистемах на примере Калужской области в зоне радиоактивного следа // Экосистемы: экология и динамика. Т. 5. № 3. С. 147-182. [*Belousova A.P., Rudenko E.E.* 2021a. Modeling of the polluted groundwater flow into confined water in the forest ecosystems by the example of the Kaluga Region in the radioactive contamination zone // Ecosystems: Ecology and Dynamics. Vol. 5. No. 3. P. 192-224.]
6. *Белоусова А.П., Руденко Е.Э.* 2021б. Оценка условий проникновения загрязняющих веществ, включая радионуклиды, в напорные подземные воды // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. Производственно-технический журнал. № 3 (159). С. 18-31.
7. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240. 2018 / Ред. С.М. Вакуловский, В.Н. Яхрюшин. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 15 с.

sredy] *Water: chemistry and ecology [Voda: khimiya i ekologiya]*. 2015;12:31-40.
3. Belousova AP, Rudenko EE. Ecological and hydrogeological studies in the territories of the European part of Russia affected by the Chernobyl accident [Ekologo-gidrogeologicheskiye issledovaniya na territoriyakh yevropeyskoy chasti Rossii, postradavshikh ot avarii na CHAES] *Water treatment, water treatment, water supply [Vodoochistka, vodopodgotovka, vodosnabzheniye] Industrial and technical magazine [Proizvodstvenno-tekhnicheskiy zhurnal]*. 2019;4 (136):38-56.
4. Belousova AP, Rudenko EE. Transformation of vulnerability of groundwater to radioactive pollution in the Chernobyl track zone in the territory of Kaluga Region [Transformatsiya uyazvimosti gruntovykh vod k radioaktivnomu zagryazneniyu v zone Chernobyl'skogo sleda na territorii Kaluzhskoy oblasti]. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2020;4 (1):18-103.
5. Belousova AP, Rudenko EE. Modeling of the polluted groundwater flow into confined water in the forest ecosystems by the example of the Kaluga Region in the radioactive contamination zone. *Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2021a;5 (3):147-182.
6. Belousova AP, Rudenko EE. Evaluation of the conditions for the penetration of pollutants, including radionuclides, into pressure groundwater [Otsenka usloviy proniknoveniya zagryaznyayushchikh veshchestv, vklyuchaya radionuklidy, v napornyye podzemnyye vody] *Vodoochistka. Water Treatment. Water Supply [Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye] Industrial and Technical Magazine [Proizvodstvenno-tekhnicheskiy zhurnal]*. 2021b;3 (159):18-31.
7. Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation with cesium-137, strontium-90 and plutonium-239+240 [*Dannyye po radioaktivnomu zagryazneniyu territorii naselonnykh punktov Rossiyskoy Federatsii tseziyem-137, strontsiyem-90 i plutoniyem-239+240*] / ed. CM. Vakulovsky, V.N. Yakhryushin. Obninsk: FGBU NPO Tayfun, 2018: 15.
8. Radiation situation in Russia and neighboring states in 2018 [*Radiatsionnaya obstanovka na*

8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. 2019. Обнинск: НПО «Тайфун». 324 с.
9. Карта радиационной обстановки на территории европейской части СССР по состоянию на декабрь 1990 г. 1991. Плотность загрязнения местности цезием-137. М.: Госкомгидромет СССР. Л. И-35-А.
10. *Zheng C., Papadopulos S.S.* 1990. A Modular Three-Dimeusional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Systems Contaminant in Groundwater. The Unites States Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Inc. Ada, Oklahoma. 231 p.

territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2018 godu]. Obninsk: FGBU NPO Tayfun, 2019:324.
9. Map of the radiation situation on the territory of the European part of the USSR as of December 1990 [*Karta radiatsionnoy obstanovki na territorii yevropeyskoy chasti SSSR po sostoyaniyu na dekabr' 1990 g.*] *Density of contamination of the area with cesium-137 [Plotnost' zagryazneniya mestnosti tseziyem-137].* Moscow: Goskomgidromet SSSR, 1991:I-35-A.
10. Zheng C, Papadopulos SS. A Modular Three-Dimeusional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Systems Contaminant in Groundwater. The Unites States Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Inc. Ada, Oklahoma, 1990:231.

USE OF A NUMERICAL EXPERIMENT IN STUDYING THE MIGRATION OF DIFFERENT POLLUTANTS IN THE GROUNDWATER OF THE KALUGA REGION IN THE AREA OF THE RADIOACTIVE TRACE

© 2023. A.P. Belousova, E.E. Rudenko, K.G. Vlasov

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
3, Gubkina Str., Moscow, 119333, Russia. E-mail: anabel@iwp.ru, belanna47@mail.ru

The purpose of this article was to use a mathematical modeling in order to study the migration of various pollutants, including radionuclides, from weakly sorbed to strongly sorbed ones that travel from groundwater to pressure groundwater through a separating layer, an aquiclude, and has varying permeability. Among others, the field of hydrogeological researches performs search and exploration of groundwater deposits. Search is the first stage which is carried out in unexplored territories, followed by exploration, the second stage, which is performed in the promising territories that were revealed during the first stage.

Our studies can be attributed to the first stage, because the territories of our choice, located in the Kaluga Region and affected by the Chernobyl accident, were unexplored. We focused on studying the migration of pollutants from groundwater through the aquiclude of the pressure waters. The direction of our search was determined by the aquiclude's ability to let the pollutants through, which is considered the most unfavorable conditions for groundwater, or its ability to keep the pollutants out, which is considered a favorable condition. However, both of these cases never exist separately in natural and artificial conditions, because they simply merge together, but, in order to study that, a thorough geological and hydrogeological knowledge of the territory is needed, which we do not possess for the study area. Therefore, our research was carried for both cases: in the first one, the aquiclude was assumed to be permeable, while in the second one it was assumed to be impermeable.

For each case, exploratory numerical-experimental studies were carried out using mathematical modeling. The object of those studies was the part of the Kaluga Region, most affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Studies concerning the first case have been already completed and published by our crew (Belousova, Rudenko, 2021a, 2021b), while the results of the second case and generalizing results of both studies are presented in this article. We studied the migration of various pollutants, including radionuclides, from groundwater through an impermeable aquiclude to the confined aquifer. We used the same profiles that were studied in the first case, but applied slightly modified scenarios and used different coefficients (Kd) of pollutant sorption distribution.

Numerical experiments of the second case were carried out according to the following scenarios: 1 – (1-3-1), 2 – (1-6-1), 3 – (1-10-1), 4 – (6-60-6), 5 – (26-260-26), 6 – (100-1000-100). The first digit is the Kd value (l/kg) in the 1st layer, the second digit – 2nd layer, the third digit – 3rd layer. This selection of coefficients was determined by the fact that their values were assigned to be higher in the aquiclude than in the upper and lower aquifers.

Each scenario was applied for two conditions: with and without radioactive decay. The starting condition was the contamination degree of groundwater, just like the contamination degree of the ground in the radioactive trace zone of the study area. However, such a spread of contamination by either radionuclides or other pollutants is not actually (in natural conditions) observed in the groundwater of this territory. Pollutant concentrations can be specified in g/l, maximum permissible concentration (MPC) and background concentrations, but we used MPC. Kd of various pollutants were selected from the known values for the Bryansk Region (Belousova, Rudenko, 2021a, 2021b); regarding radionuclides, the Kd values mainly refer to the unsaturated zone of contamination.

We established that the main factors forming the pollutant migration are the radioactive decay of the said pollutants, their sorption properties, and the hydrodispersion of groundwater streams, which, in turn, depends on the geological and hydrogeological conditions of the study area and the aquiclude permeability. The studied situation proves that aquicludes cannot ensure a full protection of pressure groundwater from pollution.

Keywords: groundwater, underground confined waters, modeling of migration processes, pollutant, radionuclides, sorption, radioactive decay.

Funding. This work was carried out for the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, No. FMWZ-2022-0002 “Research of Geoecological Processes in Hydrological Systems of Land, Formation of the Quality of Surface and Ground Waters, Problems of Water Resources Management and Water Use under Conditions of Climate Change and Anthropogenic Impacts”.

DOI: 10.24412/2542-2006-2023-2-5-39

EDN: IBYXTQ