

**БАЗОВЫЕ ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ,
ПОСТРАДАВШЕЙ ОТ АВАРИИ НА ЧАЭС¹**

© 2019 г. А. П. Белоусова^{1*}, Е. Э. Руденко¹

¹Институт водных проблем РАН

Россия 119333 Москва

*e-mail: anabel@iwp.ru

Поступила в редакцию 9.03.2016 г.

После доработки 20.12.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

Рассмотрена методика оценки защищенности грунтовых вод от загрязнения, являющаяся базовой для предварительных прогнозных оценок изменения эколого-гидрогеологических условий на загрязненной чернобыльскими радионуклидами территории Калужской области. Она послужила основой для разработки новой методики оценки защищенности напорных подземных вод от загрязнения, а также для унификации ее использования для решения различных экологических задач.

Ключевые слова: грунтовые и напорные подземные воды, радионуклиды, период полураспада, защищенность и уязвимость подземных вод, рекуррентная формула.

DOI: 10.31857/S0321-0596464393-404

ВВЕДЕНИЕ

26 апреля 2016 г. исполнилось тридцать лет с момента самой крупной антропогенной катастрофы XX в. на территории СССР — аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), которая произошла в основном в результате так называемого “человеческого фактора” и привела к катастрофическим последствиям. В Европейской части России от этой аварии пострадали почти все центральные регионы, а наиболее сильно Брянская, Тульская и Калужская области. Проблемы с загрязнением окружающей среды радионуклидами будут сказываться еще долгое время. Известно, что активность радиоактивных выпадений исчезает полностью после 10 периодов полураспада радионуклидов.

Авария на атомной станции “Фукусима 1” в Японии произошла в марте 2011 г., предположительно в результате ошибки в проектировании станции (станция устояла при землетрясении, но не выдержала воздействия цунами). Выбросы в атмосферу, загрязнение почв и подземных вод

как после аварии на ЧАЭС, так и после аварии на Фукусиме характеризуются практически аналогичными наборами радионуклидов, так как на обеих атомных станциях влиянию аварийной ситуации подверглось топливо. В настоящее время подземные воды являются уязвимым к загрязнению радионуклидами объектом окружающей среды.

В связи с этим рассмотрим базовые принципы оценки защищенности подземных вод от загрязнения, в исследуемом случае — от радионуклидов на территории Калужской области, пострадавшей от аварии на ЧАЭС.

Базовая, основополагающая методика — разработанная и усовершенствованная авторами статьи методика оценки защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами [1–3]. На основе этой методики проведены следующие исследования:

- оценены защищенность и уязвимость грунтовых вод к загрязнению радионуклидами на территории Калужской области на различные расчетные сроки с шагом, равным периоду полураспада радионуклидов, это, по суще-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00476 и по Государственному заданию: номер Программы АААА-А18-118022090104-8.

ству, — прогнозная, предварительная оценка изменения экологической ситуации;

- разработана методика оценки защищенности напорных подземных вод от загрязнения;
- проведена унификация данной методики, что позволяет упростить и ускорить соответствующие оценки.

БАЗОВАЯ СРЕДНЕМАСШТАБНАЯ (1:200 000) ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ И УЯЗВИМОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДАМИ

Авторами разработана оригинальная методика оценки защищенности и уязвимости грунтовых вод к загрязнению различными загрязняющими веществами (ЗВ), включая радионуклиды для мелко- и среднемасштабных эколого-гидрогеологических исследований [1–3]. Рассмотрим более подробно изменение степени защищенности и уязвимости грунтовых вод к загрязнению радионуклидами на территории Калужской области в масштабе 1:200 000.

Основные положения, которые следует учитывать при оценке и картографировании защищенности грунтовых вод от загрязнения различного масштаба, представлены в [1–3]. Дадим авторские определения оцениваемых показателей.

Защитная зона — зона, отделяющая подземные воды от поверхностного загрязнения и имеющая двухуровневое строение: почвы и породы зоны аэрации.

Защищенность — способность защитной зоны препятствовать проникновению загрязнения в подземные воды в течение определенного времени.

Природный защитный потенциал — способность геологической среды (почв и пород зоны аэрации) удерживать загрязнение в защитной зоне, зависящая от литологических, фильтрационных и сорбционных свойств почв и пород.

Отношение реальной техногенной нагрузки изучаемой территории к естественной защищенности подземных вод называется их **уязвимостью** к загрязнению.

Основные радионуклиды при аварии на ЧАЭС в выпадениях — ^{137}Cs и ^{90}Sr . За прошедшие после аварии 32 года активность этих радионуклидов в поверхностных выпадениях должна снизиться вдвое против начальной после аварии, так как период полураспада их составляет ~30 лет.

Для построения карт защищенности и уязвимости грунтовых вод к загрязнению необходимо иметь комплект карт, последовательность построения которых отражена в [1–3].

Карта защитной зоны строится по методике [1–3], она является базовой для построения карт защищенности и уязвимости грунтовых вод к любым ЗВ.

Карты защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами

При оценке возможности загрязнения грунтовых вод радионуклидами учитываются сорбционные свойства, обеспечивающие задержание радионуклидов почвами и породами зоны аэрации; миграционные свойства почв и пород зоны аэрации, зависящие от физико-механических, водно-физических, фильтрационных свойств, их минералогического состава; путь фильтрации (инфильтрации), т.е. мощность зоны аэрации или глубина залегания грунтовых вод; период полураспада радионуклидов и др.

Сорбция радионуклидов оказывает наибольшее влияние на задержку их породами и почвами. Основной параметр, характеризующий сорбцию, — коэффициент распределения радионуклида [1–3]. Почвы обладают наибольшей удерживающей способностью по отношению к радионуклидам, что и определяет их как буфер более высокого порядка, чем зона аэрации.

Самые токсичные из долгоживущих радионуклидов — ^{90}Sr и ^{137}Cs , поэтому оценка защищенности должна проводиться отдельно по каждому из них.

Защищенность грунтовых вод от любого ЗВ зависит от времени достижения фронтом загрязненных инфильтрационных вод водоносного горизонта (t_3) в пределах каждого выделенного на карте защитной зоны типового участка. Время прохождения растворенным в воде радионуклидом толщи почв и пород зоны аэрации мощностью M с заполнением их сорбционной емкости и последующим достижением уровня грунтовых вод можно определить так [2, 3]:

$$t_3 = \frac{M \partial n}{v} + \frac{M \delta K_p}{W}, \quad (1)$$

где t_3 — время достижения загрязненными водами водоносного горизонта; K_p , л/кг, — коэффициент распределения сорбции; δ , кг/дм³, — объемная масса скелета грунта; ∂n — полная влагоемкость (в долях единицы); v , м/сут, —

скорость просачивания инфильтрационного потока [4].

$$v = \frac{1}{\theta} \sqrt[3]{W^2 k_{\phi}}, \quad (2)$$

где θ — естественная влажность пород (в долях единицы), W — инфильтрационное питание (м/сут); k_{ϕ} — коэффициент фильтрации (м/сут).

Первое слагаемое в (1) характеризует движение влаги в ненасыщенной зоне (или движение нейтрального ЗВ), второе — физико-химическое взаимодействие (сорбцию) в системе порода–вода (или задержку ЗВ почвой или породой). В случае, когда коэффициент распределения значительно превышает единицу (как это характерно для радионуклидов), первым слагаемым в (1) можно пренебречь; вторым можно пренебречь, когда коэффициент распределения значительно меньше единицы.

Шкалу категорий естественной защищенности грунтовых вод от загрязнения целесообразно строить в зависимости от T — периода полураспада радионуклида. В этом случае выделяются следующие категории:

незащищенные грунтовые воды: $t_3 < T$; $t_3 < 30$ лет;

слабозащищенные грунтовые воды: $T < t_3 < 2T$;
30 лет $< t_3 < 60$ лет;

среднезащищенные грунтовые воды:
 $2T < t_3 < 3T$; 60 лет $< t_3 < 100$ лет;

условно защищенные грунтовые воды:
 $3T < t_3 < 10T$; 100 лет $< t_3 < 300$ лет;

защищенные грунтовые воды: $t_3 > 10T$; $t_3 > 300$ лет.

Выделение категории защищенности по времени продвижения ЗВ через защитную зону, по сути, — приближенная прогнозная оценка загрязнения грунтовых вод, в данном случае радионуклидами.

Рассмотренный подход к построению карт естественной защищенности грунтовых вод от радиоактивного загрязнения может быть использован при составлении аналогичных карт по оценке загрязнения другими высокотоксичными ЗВ.

Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs

Оценка уязвимости грунтовых вод проводится по реальному загрязнению и осуществляется путем совмещения карты защищенности грунтовых вод от загрязнения ^{137}Cs и карты радиационной обстановки после аварии на ЧАЭС [8].

Для характеристики уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs разработана категоризация степени уязвимости по отношению техногенной нагрузки по ^{137}Cs к защищенности грунтовых вод от загрязнения ^{137}Cs (табл. 1).

Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs в зоне радиоактивного следа сразу после аварии на ЧАЭС выражена на рис. 1 так: очень сильно уязвимые грунтовые воды сосредоточены на отдельных участках в среднем течении р. Ресеты, сильно уязвимые — в долинах рек в центральной части следа, среднеуязвимые — по долинам рек, притоков, оврагов и на востоке у р. Вытебети, слабо уязвимые — по водоразделам рек, очень слабо уязвимые — по периферии следа, неуязвимые сосредоточены на высоких террасах рек и частично водоразделах рек.

Для оценки уязвимости грунтовых вод спустя тридцать лет после аварии активность поверхностных выпадений ^{137}Cs уменьшена вдвое по сравнению с зафиксированной на карте [8], согласно истечению одного периода полураспада радионуклидов (табл. 2). На карте уязвимости грунтовых вод (рис. 2) на этот срок показано, что в зоне следа очень сильно уязвимых грунтовых вод уже нет, сильноуязвимые сохранились узкими полосами в долинах рек и вдоль русел, среднеуязвимые — на низких террасах рек, значительно уменьшившись по площади; площади слабоуязвимых грунтовых вод увеличились, также увеличились площади очень слабо уязвимых грунтовых вод, площади условно уязвимых и неуязвимых не изменились. Кроме этого, построен комплект карт на сроки истечения остальных периодов полураспада.

СРЕДНЕМАСШТАБНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ, НАПОРНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Рассмотрим подходы к оценке защищенности и уязвимости подземных напорных вод к загрязнению, что также важно для оценки экологической ситуации с питьевыми подземными водами, которые, как правило, сосредоточены в напорных водоносных горизонтах, залегающих ниже горизонтов грунтовых вод. Исследования по данной проблеме в России начаты В.М. Гольдбергом [5–7]. В работе [3] использованы оценки с помощью специальных индексов проникновения.

Таблица 1. Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs (определяется суммой весовых значений защищенности (0–4) и техногенной нагрузки (0–6), которые указаны в скобках для соответствующих показателей): после аварии на ЧАЭС (2–10 — суммарные весовые значения степени уязвимости): неустойчивые — $t_3 > 300$ лет, условно уязвимые < 1 , очень слабо уязвимые — $2 \div 1$, слабо уязвимые — $4 \div 3$, среднеуязвимые — $6 \div 5$, сильноуязвимые — $8 \div 7$, очень сильно уязвимые — $10 \div 9$)

Защищенность (вес)	Техногенная нагрузка Концентрация Cs^{137} ($\text{Ки}/\text{км}^2$) на поверхности земли (вес)						
	>10 (6)	8–10 (5)	6–8 (4)	4–6 (3)	2–4 (2)	1–2 (1)	<1 (0)
(4) Незащищенные $t_3 < 30$ лет	10	9	8	7	6	5	Условно уязвимые
(3) Слабозащищенные $30 < t_3 < 60$ лет	9	8	7	6	5	4	
(2) Среднезащищенные $60 < t_3 < 100$ лет	8	7	6	5	4	3	
(1) Условно защищенные $100 < t_3 < 300$ лет	7	6	5	4	3	2	
(0) Защищенные $t_3 > 300$ лет	Неустойчивые						

Оценка защищенности напорных подземных вод от загрязнения имеет особенности по сравнению с аналогичной выше приведенной оценкой для грунтовых вод. Основное отличие содержится в определении защитной зоны напорных вод.

Защитная зона напорных вод имеет также два уровня:

первый — собственно грунтовые воды (или другие напорные водоносные горизонты, залегающие выше изучаемого напорного горизонта),

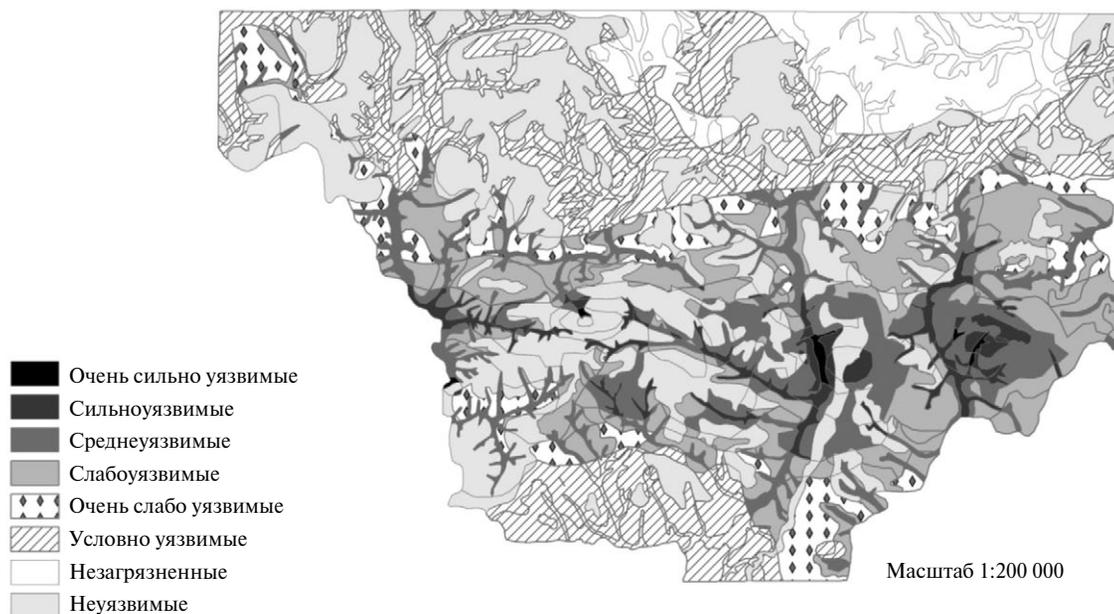


Рис. 1. Картограмма уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС на территории Калужской области.

Таблица 2. Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs (определяется суммой весовых значений защищенности (0–4) и техногенной нагрузки (0–4), которые указаны в скобках для соответствующих показателей) спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС (2–8 — суммарные весовые значения уязвимости)

Защищенность (вес)	Техногенная нагрузка Концентрация Cs^{137} ($\text{Ки}/\text{км}^2$) на поверхности земли (вес)					
	>5 (4)	4–5 (4)	3–4 (3)	2–3 (2)	1–2 (1)	<1 (0)
(4) Незащищенные $t_3 < 30$ лет	8	8	7	6	5	Условно уязвимые
(3) Слабозащищенные $30 < t_3 < 60$ лет	7	7	6	5	4	
(2) Среднезащищенные $60 < t_3 < 100$ лет	6	6	5	4	3	
(1) Условно защищенные $100 < t_3 < 300$ лет	5	5	4	3	2	
(0) Защищенные $t_3 > 300$ лет	Неуязвимые					

которые имеют двойное воздействие на напорные воды: они могут быть источником загрязнения напорного водоносного горизонта, если они разгружаются (перетекают) в нижезалегающий напорный водоносный горизонт; или они являются областью защиты напорных вод, если в них

разгружаются (перетекают) нижезалегающие напорные воды;

второй — водоупорная толща (водоупор), отделяющий горизонт напорных вод от горизонта грунтовых вод.

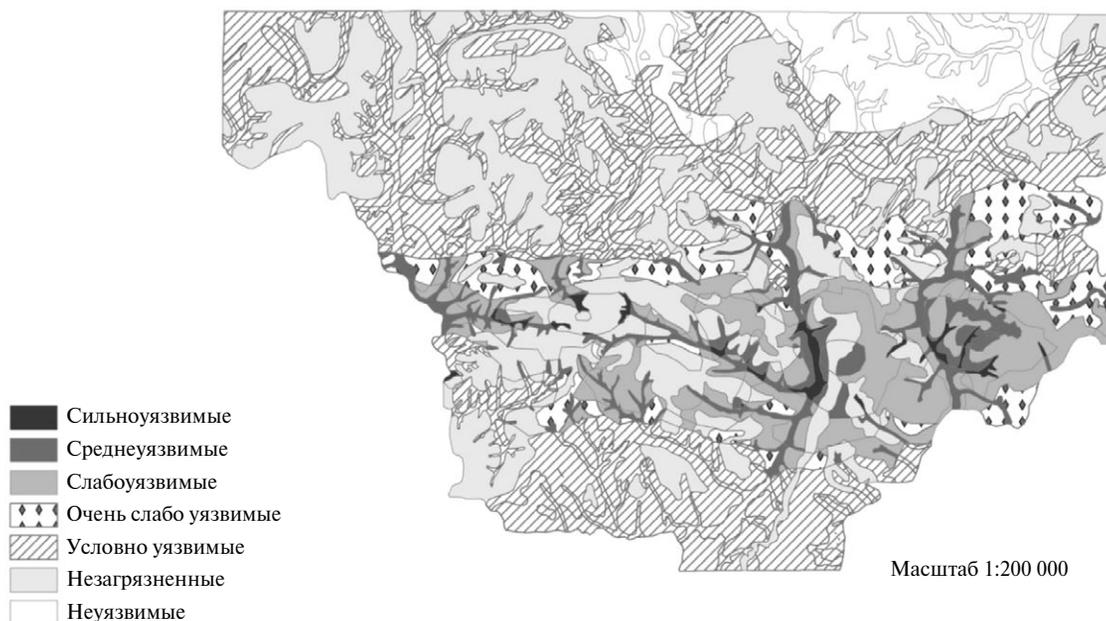


Рис. 2. Картограмма уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС на территории Калужской области.

Защитная зона — это зона, отделяющая напорные подземные воды от загрязнения, поступающего из вышележающего водоносного горизонта, и имеющая двухуровневое строение: вышележающий водоносный горизонт и водоупор, разделяющий эти водоносные горизонты.

Защищенность — способность защитной зоны препятствовать проникновению загрязнения в подземные напорные воды из вышележающего водоносного горизонта в течение определенного времени.

Природный защитный потенциал — способность геологической среды удерживать загрязнение в защитной зоне, зависящая от литологических, фильтрационных, гидродинамических и сорбционных свойств пород.

Оценка и картирование защищенности напорных подземных вод, залегающих ниже горизонта грунтовых вод, проводилась для части территории Калужской области в зоне радиоактивного следа от аварии на ЧАЭС (масштаб карт 1:200 000).

Гидрогеологические условия на юге Калужской области: безнапорные водоносные горизонты (грунтовые воды) включают в себя воды четвертичных (аллювиальных, гляциальных, флювиогляциальных, болотных, пролювиальных горизонтов), меловых и юрских отложений, все эти водоносные горизонты связаны между собой и не имеют выдержанных водоупоров внутри этой толщи (комплекса); напорные водоносные горизонты пресных подземных вод включают в себя множество связанных между собой водоносных горизонтов каменноугольного возраста; между двумя этими толщами (водоносными комплексами) залегает выдержанный

по площади верхнеюрский водоупор, разделяющий эти толщи.

Для построения карты защитной зоны необходимо исследовать первый ее уровень с точки зрения оценки степени влияния грунтового водоносного комплекса на возможность загрязнения напорного водоносного комплекса через него. Степень этого влияния оценивается величиной водопроницаемости (km), или способностью профильтровать через себя загрязненные воды, и разностью уровней первого и второго водоносных комплексов ($H_1 - H_2$), обеспечивающей интенсивность и направленность перетекания подземных вод между этими комплексами.

Второй уровень защитной зоны характеризуется параметрами водоупора: коэффициентом фильтрации (k_ϕ) и мощностью (m_0). В связи с тем, что нет подробных сведений о литологическом строении водоупора (раздельного слоя), коэффициент фильтрации задавался постоянным для всей его толщи, значения его изменялись только для различных расчетных сценариев.

Таким образом, для оценки потенциала защитной зоны использовались три показателя: km , k_ϕ и m_0 (табл. 3).

Оценка проводилась следующим образом:

— всем показателям присваивались весовые значения в порядке увеличения в зависимости от степени ухудшения защитных свойств (увеличение значения km приводит к ухудшению защитных свойств, т.е. загрязненная вода интенсивнее профильтруется внутри грунтового потока и быстрее достигнет водоупора, поэтому весовое значение по мере ухудшения защитных свойств увеличивается; аналогичная ситуация и с раз-

Таблица 3. Определение потенциала защитной зоны (сумма трех показателей: весовых значений водопроницаемости (km), мощности водоупора m_0 и разницы уровней водоносных горизонтов ($H_1 - H_2$); для km вес присвоен каждому отдельному интервалу реальных размерных значений ($m^2/сут$) — в квадратных скобках (1–6); для m_0 вес присвоен интервалам размерных значений (м) — в квадратных скобках (1, 3, 6); для ($H_1 - H_2$) вес присвоен интервалам размерных значений (м) — в квадратных скобках (1–6))

$km, m^2/сут$	$m_0, м$			$H_1 - H_2, м$
	10–30 [1]	0–10 [3]	0.0 [6]	
0–10 [1]	3	5	8	1–10 [1]
10–20 [2]	5	7	10	10–20 [2]
20–50 [3]	7	9	12	20–40 [3]
50–100 [4]	9	11	14	40–60 [4]
100–500 [5]	11	13	16	>60 [5]
500–1000 [6]	13	15	18	0.0 [6]

ностью уровней ($H_1 - H_2$); весовое значение m_0 , наоборот, увеличивается при уменьшении мощности водоупора);

— затем проводилось суммирование весовых значений трех показателей и устанавливался потенциал защитной зоны: высокий (весовое значение 0–5), средний (5–10), слабый (10–15), очень слабый (15–18), очень высокий — эта категория вводится дополнительно для области, где грунтовые воды не являются источником загрязнения напорных вод, где их уровень залегает ниже пьезометрического уровня напорных вод.

При наличии сведений о литологическом строении водоупора и его фильтрационных свойствах последний показатель может быть включен при оценке защитного потенциала. Желательно, чтобы диапазоны изменения весовых величин отдельных показателей были близкими, чтобы не исказить суммарные значения всех показателей. Результаты оценки потенциала защитной зоны приведены в табл. 3.

На схематической карте защитной зоны (рис. 3) выделены 42 типовых участка с различным строением защитной зоны по трем показателям и по величине защитного потенциала (табл. 3), описание которых приведено в экспликации к карте (табл. 4).

На карте (рис. 3) видно, что в долинах рек Болвы, Ресеты и Жиздры распространены территории с очень слабым защитным потенциалом, где напорные и грунтовые воды не разделены водоупором, а представляют собой единый водоносный комплекс. На незначительных территориях пьезометрический уровень напорного водоносного комплекса превышает уровень грунтового водоносного комплекса (хотя и незначительно), что определяет отсутствие перетекания загрязненных грунтовых вод в напорные. На большей части территории отмечается слабый защитный потенциал защитной зоны напорного водоносного комплекса, и только на незначительных участках распространен средний и высокий защитный потенциал.

Таблица 4. Экспликация к схематической карте защитной зоны напорных подземных вод (фрагмент) (пример описания типового участка № 29 (3-4-6-13 слабый защитный потенциал): первая цифра в скобке — мощность водоупора, разделяющего грунтовые воды от напорных вод, — составляет 0–10 м; вторая — водопроницаемость напорного водоносного горизонта — 50–100 м²/сут; третья — превышение уровня грунтовых вод над пьезометрическим уровнем напорного водоносного горизонта, равное нулю; четвертая — сумма весовых значений показателей составляет 13, что соответствует слабому защитному потенциалу защитной зоны напорного водоносного горизонта (табл. 3); жирный шрифт — участки, на которых пьезометрический уровень напорного водоносного горизонта превышает уровень грунтового водоносного горизонта, что фиксирует перетекание напорных подземных вод из напорного водоносного горизонта в грунтовый и определяет защищенность напорного горизонта от загрязнения через грунтовый водоносный горизонт)

№ типового участка на карте	Весовые значения показателей (1) — номер показателя в оцифровке типового участка			Σ сумма весовых значений показателей	Защитный потенциал
	m_0	k_m	$H_1 - H_2$		
1	6	6	6	18	Очень слабый
2	6	3	6	15	То же
3	6	5	6	17	»
10	1	4	4	9	Средний
11	1	4	5	10	Слабый
12	1	4	2	7	Средний
13	1	2	3	6	»
14	1	3	2	6	»
15	1	3	3	7	»
27	3	3	2	8	»
28	3	4	2	9	»
29	3	4	6	13	Слабый
30	3	2	2	7	Средний
41	3	6	0 (от -1 до -10)	9	Очень высокий
42	3	4	0 (от -1 до -10)	7	То же

Карта защищенности подземных вод от загрязнения строится путем наложения карты защитной зоны и карты интенсивности проникновения нейтрального, несорбируемого мигранта через защитную зону.

Защищенность напорных вод от любого ЗВ зависит от t_3 . Время прохождения растворенным в воде несорбируемым ЗВ толщи почв и пород зоны аэрации мощностью M вычислялось с использованием модели поршневого вытеснения по первому члену уравнения (1).

Для определения времени t_3 по (1) необходимо рассчитать скорость просачивания по формуле (2), в которой один из главных параметров — инфильтрационное питание (W).

В исследуемом случае W — не прямой параметр, характеризующий поступление атмосферных осадков в напорный водоносный комплекс. Питание поступает в этот комплекс через перетекание из грунтового водоносного комплекса. Это и определяет некоторые трудности определения этой величины.

Попытки определения величины питания напорного горизонта через известный параметр перетекания [10, 11] привели к получению величин, во много раз превышающих значение инфильтрационного питания грунтового водоносного горизонта, что связано с тем, что параметр перетекания оценивается в режиме водоотбора из водоносного горизонта с привлечением значительных объемов воды к водозаборным скважинам в радиусе их влияния.

При использовании уравнения (3), приведенного в работе [9] для определения величины взаимосвязи $W_{вз}$ при перетекании, также получается его завышенное значение, хотя и гораздо меньшее, чем в случае использования метода [10, 11] по аналогичной причине:

$$W_{вз} = k_0 \frac{H_1 - H_2}{m_0}, \quad (3)$$

где k_0 , м/сут, — коэффициент фильтрации водоупора; m_0 , м, — мощность водоупора; $H_1 - H_2$, м, — разность уровней напорного и грунтового водоносных горизонтов.

Для решения этой проблемы авторами выбран другой способ определения питания — перетекания из грунтового водоносного горизонта в напорный. Основой данного способа явились режимные гидрогеологические наблюдения за уровнями грунтового и напорного водоносного горизонтов на соседней от изучаемой

территории. По данным этих наблюдений, максимальная величина инфильтрационного питания верхнего грунтового комплекса составила 4.59 м/сут, а питание нижнего напорного каменноугольного комплекса — 1.14 м/сут. Сравнивая эти две величины, можно сделать вывод, что инфильтрационное питание напорного водоносного комплекса составляет 25% от питания грунтового водоносного комплекса.

Таким образом, для определения инфильтрационного питания напорного водоносного горизонта установлены два значения: 25% (по данным режимных наблюдений) и 10% (минимальное значение) от величины инфильтрационного питания грунтового водоносного комплекса.

За исходное инфильтрационное питание грунтового водоносного комплекса приняты величины 200, 100 и 60 мм/год, которые установлены для изучаемого региона при оценке защищенности грунтовых вод от загрязнения [1–3].

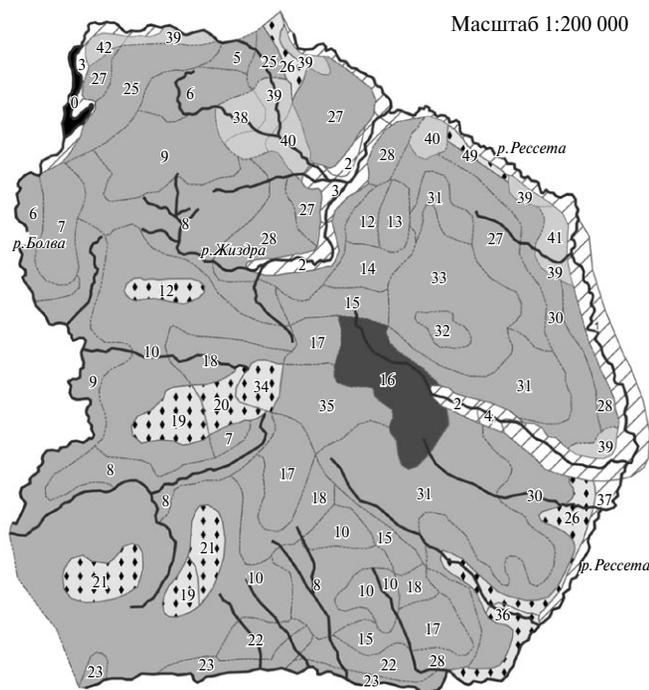
Значения k_0 на изучаемой территории не определялись, поэтому расчеты проводились для трех значений: 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} м/сут (0.0365, 0.365, 3.65 м/год).

Мощность водоупора (m_0) определялась по карте защитной зоны (рис. 3) в интервалах 5, 10, 20, 30 м.

Вместо θn (естественная влажность пород) принято значение активной пористости, равное 0.2 (в долях единицы).

Таким образом, рассмотрены три варианта сценария оценки защищенности напорных подземных вод от загрязнения нейтральными ЗВ для разных величин инфильтрационного питания грунтовых вод: 200, 100 и 60 мм/год; в каждом варианте рассмотрены по два значения инфильтрационного питания напорных вод: 25 и 10%, три значения коэффициента фильтрации водозабора: 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} м/сут. Результаты расчета времени проникновения нейтрального ЗВ (t_3) в подземные воды при $W = 100$ мм/год приведены в табл. 5. Соответственно, построены три схематические карты защищенности напорных подземных вод от загрязнения нейтральными ЗВ.

По результатам расчетов установлены следующие степени защищенности напорных подземных вод от загрязнения нейтральными ЗВ: $t_3 = 0-10$ лет — незащищенные, $t_3 = 10-30$ лет — слабозащищенные, $t_3 = 30-50$ лет — среднезащищенные, $t_3 > 50$ лет — защищенные.



Потенциал защитной зоны

- Очень слабый
- Слабый
- Средний
- Высокий
- Номер типового участка
- Область распространения единого водоносного горизонта (отсутствие водоупора между грунтовыми и напорными водами)
- Территория, на которой пьезометрическая поверхность напорного водоносного горизонта залегает выше уровня грунтовых вод
- Водохранилище
- Реки

Рис. 3. Картограмма защитной зоны напорных подземных вод.



Степень защищенности подземных вод от загрязнения при 10% от W

- 0–10 лет – незащищенные
- 10–30 – слабозащищенные
- 30–50 лет – среднезащищенные
- >50 лет – защищенные
- при 25% от W
- 0–10 лет – незащищенные
- 10–30 – слабозащищенные
- 30–50 лет – среднезащищенные
- >50 лет – защищенные
- Область распространения единого водоносного горизонта (отсутствие водоупора между грунтовыми и напорными водами)
- Территория, на которой пьезометрическая поверхность напорного водоносного горизонта залегает выше уровня грунтовых вод
- Водохранилище
- Реки

Рис. 4. Картограмма защищенности напорных подземных вод от загрязнения нейтральными ЗВ.

На рис. 4 (при инфильтрационном питании грунтовых вод $W = 100$ мм/год — среднее значение) показано, что на низких террасах рек

Таблица 5. Расчет времени проникновения нейтрального ЗВ (t_3) в подземные воды (год) при исходном инфильтрационном питании грунтовых вод $W = 100$ мм/год

W , м/год	m_0 , м			
	5	10	20	30
	$k_0 = 0.0365$ м/год			
0.025 (25% от W)	7.05	14.11	28.21	42.32
0.01 (10% от W)	13.05	26.10	52.20	78.30
	$k_0 = 0.365$ м/год			
0.025 (25% от W)	3.26	6.54	13.07	19.61
0.01 (10% от W)	6.03	12.06	24.12	36.19
	$k_0 = 3.65$ м/год			
0.025 (25% от W)	1.52	3.04	6.08	9.12
0.01 (10% от W)	2.80	5.60	11.20	16.80

Ресеты и Жиздры и на северо-западе долины р. Болвы простирается единый водоносный комплекс, что характеризует незащищенность напорных вод от загрязнения, поступающего из грунтового потока, а на незначительных участках уровни напорного комплекса превышают уровни грунтового, что характеризует его защищенность от загрязнения сверху (рис. 3). При 25%-й инфильтрации на более высоких террасах рек Ресеты и Жиздры и на северо-западе долины Болвы, а также на водораздельном пространстве р. Ресеты на востоке изучаемой территории распространены незащищенные ПВ, уязвимые к загрязнению нейтральными ЗВ; на западе территории распространены слабозащищенные ПВ. При 10%-й инфильтрации на востоке территории распространены слабозащищенные ПВ, а на западе защищенные.

При анализе трех сценариев показано, что по мере увеличения инфильтрационного питания степень защищенности подземных вод уменьшается, увеличивается их уязвимость к загрязнению нейтральными ЗВ. К числу нейтральных ЗВ могут быть отнесены макрокомпоненты (хлориды, сульфаты), нитраты, нефтепродукты и др.

УНИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

С использованием многолетнего опыта оценки защищенности подземных вод от загрязнения различными ЗВ, включая радионуклиды, проведено усовершенствование методики [1–3], которое позволило использовать ее для решения комплексных экологических задач при загрязнении подземных вод различными ЗВ и при изменениях климатических условий или антропогенных факторов.

Унификация методики оценки защищенности подземных вод сводится к упрощению расчетной процедуры по выражениям (1) и (2), базирующейся на выделении некоторого математического ядра, которое в расчетах не меняется, и некоторой изменяющейся величины, с которой проводятся вычисления в зависимости от решаемой задачи.

Рассмотрим вычислительные процедуры для трех решаемых задач.

Первая задача — миграция различных загрязняющих веществ

Как отмечено выше, защищенность грунтовых вод от любого ЗВ зависит от t_3 в пределах каждого выделенного на карте защитной зоны типового участка, которое определяется по выражениям (1) и (2).

Объединим (1) и (2):

$$t_3 = \frac{M\vartheta n}{\sqrt[3]{W^2 k_\phi}} + \frac{M\vartheta \delta K_p}{W}, \quad (3)$$

перепишем (3):

$$t_3 = a + bx, \quad (4)$$

где: $a_1 = \frac{M\vartheta n}{\sqrt[3]{W^2 k_\phi}}$, $b_1 = \frac{M\vartheta \delta}{W}$, $x = K_p$.

Выражение (4) — рекуррентная формула для расчета времени миграции ЗВ с различными значениями коэффициента распределения при

всех других неизменяющихся величинах: величины a и b характеризуют природные особенности защитной зоны.

Вторая задача — изменения инфильтрационного питания

Преобразуем (1):

$$t_3 = \frac{M\vartheta n}{\sqrt[3]{W^2 k_\phi}} + \frac{M\vartheta \delta K_p}{W}, \quad (5)$$

$$t_3 = \frac{a_2}{\sqrt[3]{y^2}} + \frac{b_2}{y}, \quad (6)$$

где $a_2 = \frac{M\vartheta n}{\sqrt[3]{k_\phi}}$, $b_2 = M\vartheta \delta K_p$, $y = W$.

Выражение (6) — рекуррентная формула для расчета времени миграции ЗВ при изменении инфильтрационного питания при неизменных других величинах: величина a характеризует природные особенности защитной зоны, а величина b характеризует взаимодействие — сорбцию ЗВ природной средой — породой.

Третья задача — миграция различных загрязняющих веществ при различных величинах инфильтрационного питания

$$t_3 = \frac{a_2}{\sqrt[3]{y^2}} + \frac{cx}{y}, \quad (7)$$

где $a_2 = \frac{M\vartheta n}{\sqrt[3]{k_\phi}}$, $c = M\vartheta \delta$, $x = K_p$, $y = W$.

Выражение (7) — рекуррентная формула для расчета времени: величины a и c характеризуют природную среду в условиях двух меняющихся показателей — ЗВ и инфильтрационного питания.

Предложенная усовершенствованная методика среднемасштабной оценки защищенности подземных вод от загрязнения позволяет проследить возможные вариации развития процесса загрязнения в зависимости от индивидуального ЗВ — от нейтрального до высокотоксичного при различных сценариях изменения климата: от иссушения до его увлажнения.

ВЫВОДЫ

С использованием базовой методики среднемасштабной оценки защищенности и уязвимости грунтовых вод к загрязнению радионуклидами получены предварительные прогнозные оценки изменения эколого-гидро-

геологической ситуации (на части территории Калужской области, пострадавшей от аварии на ЧАЭС) на различные прогнозные сроки, которые могут быть использованы для планирования научных исследований более крупного масштаба, выбора мест для расположения водозаборов грунтовых вод и ведения экологического мониторинга.

Разработана оригинальная новая методика оценки защищенности подземных, напорных вод от загрязнения, которая имеет свои особенности и отличия по сравнению с аналогичной оценкой для грунтовых вод.

Для оценки защитного потенциала защитной зоны использованы три показателя: величина водоотдачи грунтового водоносного горизонта, разность уровней первого и второго водоносных горизонтов — первый уровень защитной зоны; коэффициент фильтрации водоупора и его мощность — второй уровень защитной зоны. Построена схематическая карта защитной зоны напорных подземных вод.

Оценка защищенности подземных напорных вод от загрязнения нейтральными ЗВ проводилась путем определения времени их миграции по модели поршневого вытеснения. Рассмотрены три варианта-сценария оценки защищенности напорных подземных вод от загрязнения нейтральными ЗВ для разных значений инфильтрационного питания грунтовых вод (200, 100 и 60 мм/год), в каждом варианте рассмотрены по два значения инфильтрационного питания напорных вод (25 и 10%) и по три значения коэффициента фильтрации водоупора (10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} м/сут). Построены три схематические карты защищенности напорных подземных вод от загрязнения нейтральными ЗВ.

Методика может быть использована для выбора мест расположения водозаборов пресных напорных вод и ведения экологического мониторинга.

Проведено усовершенствование ранее разработанной методики оценки защищенности подземных вод от загрязнения различными ЗВ, включая радионуклиды. Данная методика может быть использована для решения комплексных экологических задач при загрязнении подземных вод различными ЗВ и в условиях изменяющегося климата или действия антропогенных факторов. Усовершенствование методики сводится к унификации оценки защищенности подземных вод, к упрощению расчетной процедуры, базирующейся на выде-

лении некоторого ядра, которое в расчетах не изменяется, и некоторой изменяющейся величины, с которой проводятся вычисления в зависимости от решаемой задачи. Рассмотрены три типа задач: миграция различных ЗВ, изменение климата, а также изменение климатических условий и набора ЗВ. Унифицированный метод оценки защищенности подземных вод от загрязнения позволяет уменьшить затраты времени на проведение расчетных процедур, что в свою очередь позволяет заранее построить и иметь комплекты карт защищенности подземных вод от загрязнения любыми ЗВ, при любых природных и антропогенных условиях и на любые расчетные прогнозные сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова А.П. Ресурсы подземных вод и их защищенность от загрязнения в бассейне реки Днепр и отдельных его областях: Российская территория. М.: ЛЕНАНД, 2005. 168 с.
2. Белоусова А.П. Оценка защищенности подземных вод от загрязнения радионуклидами // Вода: химия, экология. 2012. № 5. С. 11–17.
3. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология. Учебник для вузов. М.: Академкнига, 2006. 397 с.
4. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Госгеотехиздат, 1963. 203 с.
5. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
6. Гольдберг В.М. Оценка условий защищенности подземных вод и построение карт защищенности. Гидрогеологические основы охраны подземных вод. М.: Недра, 1984. С. 171–177.
7. Гольдберг В.М. Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
8. Карта радиационной обстановки на территории европейской части СССР по состоянию на декабрь 1990 г. Плотность загрязнения местности цезием-137. М.: Госкомгидромет СССР, 1991.
9. Ленченко Н.Н. Динамика подземных вод. Министерство образования и науки РФ. Московский геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе. Центр дистанционного образования. М.: 2005. 211 с.
10. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. Учебник. М.: МГУ, 1995. 368 с.
11. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1979. 368 с.

BASIC ECOLOGICAL-HYDROGEOLOGICAL EXAMINATION OF EUROPEAN PART OF RUSSIA THAT SUFFERED FROM CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT EMERGENCY

© 2019 A. P. Belousova^{1,*}, E. E. Rudenko¹

¹ *Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences*

Russia 119333 Moscow

**e-mail: anabel@iwp.ru*

Received: 09.03.2016

Revised version received: 20.12.2018

Accepted: 25.12.2018

A technique for assessment of confined groundwater security against contamination has been evaluated and developed to forecast changes in ecological-hydrogeological conditions in the part of the Kaluga region that was contaminated with Chernobyl radionuclides. This new technique is also useful for resolution of various ecological issues other than just radionuclide contamination.

Keywords: groundwater, confined groundwater, radionuclides, half-life period, water security, vulnerability of underground water, recurrence formula.

DOI: 10.31857/S0321-0596464393-404