

ПРОГНОЗ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В РЕЧНУЮ СЕТЬ ИЗ ПЛАСТА-КОЛЛЕКТОРА ПОДЗЕМНОЙ ЗАКАЧКИ ЖИДКИХ НИЗКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

Мальковский В.И., Пэк А.А., Юдинцев С.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва, Россия
syud@igem.ru

Континентальная и прибрежная (шельфовая) части Арктического региона в силу их огромной экономической значимости для нашей страны [1] будут интенсивно осваиваться уже в ближайшие десятилетия. Однако активной хозяйственной деятельности в этом регионе может воспрепятствовать или существенно ее осложнить наличие участков радиоактивного загрязнения, связанного с испытаниями ядерного оружия, затоплением радиоактивных отходов и реакторных отсеков атомных подводных лодок. Пусть и меньшую, но все же потенциально значимую опасность радиоактивного загрязнения представляют подземные хранилища жидких радиоактивных отходов (ЖРО) прошлой оборонной деятельности. Эти ЖРО в огромных количествах закачивались на полигонах Сибирского химического комбината (СХК, Северск) и Горно-химического комбината (ГХК, Железногорск), расположенных вблизи крупнейших рек Арктического региона – Оби и Енисея или их притоков. Только на двух этих предприятиях с 1963 года на глубины от 180 до 500 метров было закачано свыше 56 млн. м³ жидких радиоактивных отходов предприятий оборонного ядерного комплекса с общей активностью около 2 млрд. Кюри или 7.4×10^{19} Бк, Бк – распад в секунду [2, 3]. Вынос радионуклидов из зоны закачки и поступление их в воды рек Енисей и Обь может привести к уменьшению используемых водных ресурсов Арктики, загрязнению побережья и придонных слоев Обской губы и Енисейского залива (рис. 1а), попаданию радионуклидов в сферу жизнедеятельности человека. В настоящей статье дается количественный прогноз распространения загрязнения в районе Горно-химического комбината. Для обеспечения максимальной достоверности такого прогноза были тщательно проанализированы имеющиеся данные о гидрогеологии данных участков и разработана математическая модель, наиболее адекватно описывающая характер миграции радионуклидов. Закачка ЖРО на ГХК производилась на полигоне «Северный», расположенном на восточном берегу Енисея в Красноярском крае (рис. 1). С точки зрения гидрогеологии зона закачки представляет собой малый артезианский бассейн, заполненный слоистой толщей песчано-глинистых отложений [2]. В них можно выделить 3 относительно высокопроницаемых водоносных песчаных горизонта, отделенных друг от друга слабопроницаемыми глинистыми водоупорными пластами. Эти горизонты нумеруются снизу вверх и обозначаются, соответственно, как Горизонт I, II, III. Нижний водоносный горизонт ограничен снизу плотными кристаллическими породами фундамента. Закачка осуществлялась в Горизонты I и II (нижний и средний водоносные горизонты). Низкоактивные ЖРО (с удельной активностью до 10^{-6} Ки/л) закачивались в Горизонт II. Среднеактивные ЖРО (с удельной активностью до 10^{-2} Ки/л) закачивались в Горизонт I. С 1972 года Горизонт I использовался также для закачки ЖРО с высокой удельной активностью – до 5 Ки/л [2]. Всего с 1967 года захоронено около 6.4. млн. м³ ЖРО суммарной активностью более 2×10^{19} Бк. Поскольку наиболее опасные ЖРО закачивались в Горизонт I, то, прежде всего, был рассмотрен прогноз распространения радиоактивного загрязнения в этом пласте-коллекторе.

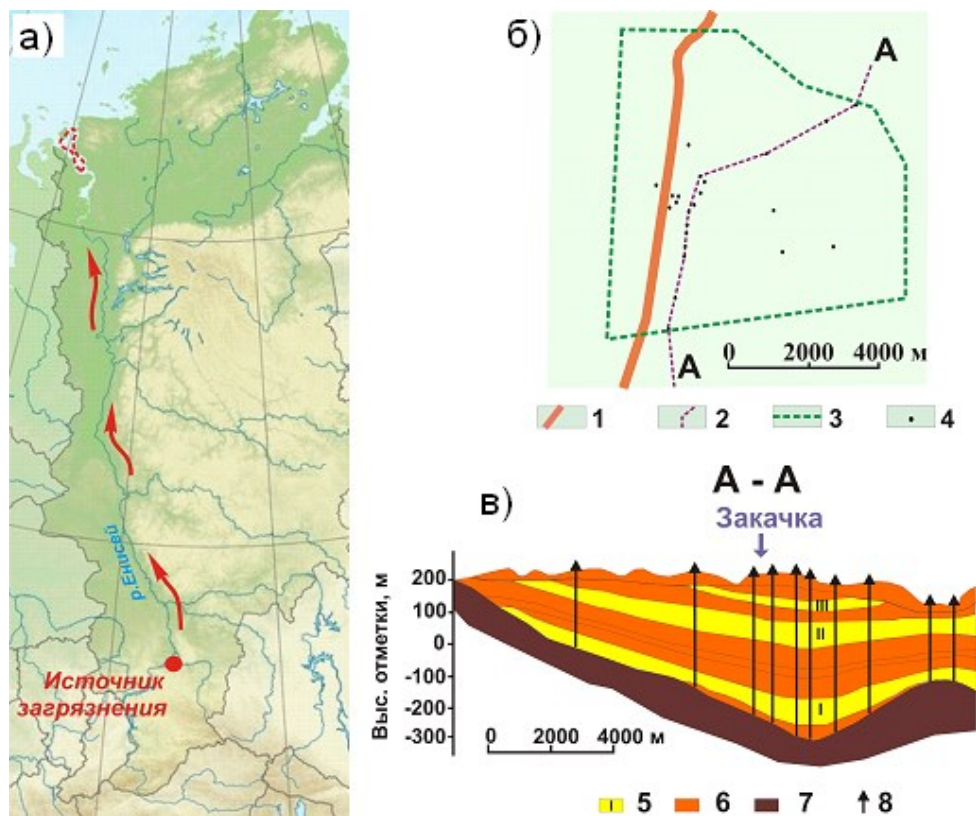


Рис. 1. Направление возможного распространения радиоактивного загрязнения по р. Енисей от ГХК (а) и схема полигона закачки ЖРО в плане (б) и разрезе (в) по данным работ [2, 4]. 1 – правобережный разлом; 2 – профиль; 3 – граница санитарно-защитной зоны; 4 и 8 – скважины в плане и разрезе, соответственно; 5 – водоносные горизонты I, II и III; 6 – слабопроницаемые водоупорные пласты; 7 – плотные кристаллические породы основания.

Результаты моделирования распространения загрязнения показали, что в течение, по крайней мере, 1000 лет загрязнение не выйдет за пределы санитарно-защитной зоны полигона. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, низкой скоростью регионального течения подземных вод в Горизонте I. Во-вторых, плотность ЖРО существенно превышает плотность пластовых вод. Вследствие этого ЖРО стекают в сторону понижения Горизонта I. К северу от зоны закачки ЖРО находится депрессия основания Горизонта I. Региональное течение в зоне закачки имеет преимущественно северное и северо-восточное направление. Достигнув области депрессии Горизонта I, основные массы ЖРО практически останавливаются, поскольку сила тяжести противодействует региональному течению и удерживает ЖРО в зоне депрессии, которая играет, тем самым, роль естественной ловушки [4].

В Горизонте II скорости регионального течения подземных вод существенно выше, чем в Горизонте I. Плотность ЖРО, закачиваемых в Горизонт II, лишь незначительно отличается от плотности пластовых вод. Следовательно, нет оснований ожидать, что природные ловушки в Горизонте II смогут задержать продвижение ЖРО с региональным течением. Таким образом, ЖРО, закачанные в Горизонт II, будут представлять большую экологическую угрозу, чем ЖРО в Горизонте I, несмотря на меньшие значения их удельной активности. Ниже приведены результаты моделирования распространения загрязнения в Горизонте II для оценки степени опасности поступления радионуклидов из этого пласта в р. Енисей.

Плотность ЖРО в Горизонте II незначительно отличается от плотности пластовых вод, поэтому влиянием архимедовых сил на течение подземных вод можно пренебречь. Поскольку размеры Горизонта II по простиранию значительно превышают его мощность, для описания движения подземных вод и переноса ими загрязнителя вполне допустимо использовать приближение плановой модели. В этом случае составляющие скорости фильтрации v_x , v_y удовлетворяют уравнениям Дарси в виде:

$$v_x = -f \frac{\partial H_2}{\partial x}, \quad v_y = -f \frac{\partial H_2}{\partial y},$$

где f – коэффициент фильтрации, H_2 – локальные значения напора в Горизонте II, x, y – декартовы координаты в плановой плоскости (ось x направлена с запада на восток, ось y – с юга на север). Условие водного баланса и определяющее уравнение для расчета напоров в Горизонте II в этом случае запишется в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(f \delta \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(f \delta \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) = w_1 + w_3,$$

где δ – мощность Горизонта II, w_1, w_3 – объемы подземных вод, просачивающиеся из Горизонта II через единичную поверхность водоупорных пластов в единицу времени в Горизонты I и III, соответственно. Выражения для w_1, w_3 имеют вид:

$$w_1 = \sigma_1 (H_2 - H_1), \quad w_3 = \sigma_3 (H_2 - H_3),$$

где σ_1 и σ_3 – параметры просачивания через верхний и нижний водоупорные границы Горизонта II, H_1 и H_3 – напоры в Горизонтах I и III, соответственно. Согласно [5], σ_1 и σ_3 можно представить в виде:

$$\sigma_1 = f^{lower} / \Delta^{lower}, \quad \sigma_3 = f^{upper} / \Delta^{upper},$$

где f^{upper} и f^{lower} – коэффициенты фильтрации водоупорных пластов, ограничивающих Горизонт II сверху и снизу, соответственно, а Δ^{upper} и Δ^{lower} – мощности этих пластов.

Величины σ_1 и H_1 рассчитаны при исследовании распространения загрязнителя в Горизонте I [4]. Горизонт III – безнапорный. В климатических условиях Красноярского края с удовлетворительной точностью можно полагать, что уровень подземных вод (и, следовательно, значение H_3) совпадает с рельефом. Величина σ_3 неизвестна.

Исходные данные для моделирования определены по публикации [6]. С запада область закачки в Горизонт II ограничена правобережным разломом (рис. 1, 2), представляющим собой непроницаемый экран (что подтверждается данными полевых тестов [2, 6]), с востока – зоной выклинивания Горизонта II (рис. 2). Поскольку большая часть исходных данных представлена в графической форме, то для удобства перевода их в цифровой формат были введены безразмерные координаты X, Y , единичные расстояния по которым соответствуют 500 м. Привязка координат к картам осуществлялась по двум контрольным точкам, соответствующим положениям наблюдательных скважин С-8 ($X = 1, Y = 4$) и С-22 ($X = 10.1, Y = 15.1$). По измерениям в наблюдательных скважинах известны значения напоров в Горизонте II в N точках плановой плоскости $\{H_2^m(x_i^H, y_i^H), i = 1, \dots, N\}$, где (x_i^H, y_i^H) – координаты i -й наблюдательной скважины, в которой измерялись напоры в Горизонте II. По тестовым откачкам в M скважинах получены значения водопроводимости $\tau = \mathcal{J}$ Горизонта II в M точках: $\{\tau_2^m(x_i^r, y_i^r), i = 1, \dots, M\}$, где (x_i^r, y_i^r) – координаты i -ой скважины, в которой проводилась тестовая откачка в Горизонте II. Для определения $\tau(x, y)$ не в отдельных точках, а во всей области, чтобы иметь возможность получить $H_2(x, y)$ из решения уравнения

водного баланса, необходимо решить калибровочную задачу. Она заключается в определении таких $\tau(x, y)$ и $\sigma_3(x, y)$, чтобы:

$$\tau(x_i^r, y_i^r) = \tau_2^m(x_i^r, y_i^r), \quad i = 1, \dots, M,$$

а значения $H_2(x, y)$, полученные из решения уравнения водного баланса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\tau(x, y) \frac{\partial H_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\tau(x, y) \frac{\partial H_2}{\partial y} \right] = \sigma_1(x, y)(H_2 - H_1) + \sigma_3(x, y)(H_2 - H_3),$$

удовлетворяли условию:

$$H_2(x_i^H, y_i^H) = H_2^m(x_i^H, y_i^H), \quad i = 1, \dots, N.$$

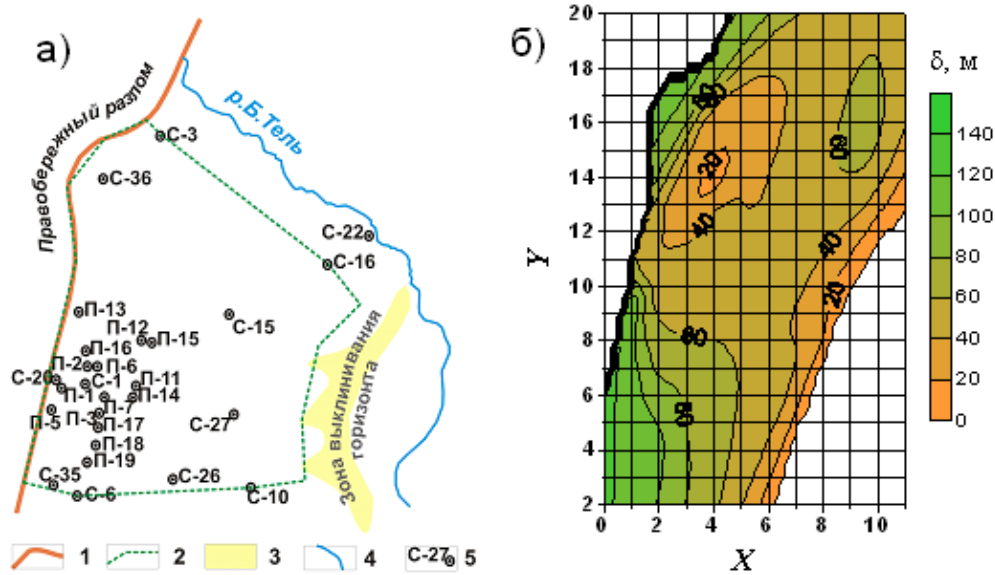


Рис. 2. Область моделирования (а) и распределение мощности Горизонта II (б) по данным работы [6]. 1 – правобережный разлом; 2 – граница области решения калибровочной задачи; 3 – зона выклинивания Горизонта II; 4 – река Б.Тель; 5 – наблюдательные скважины.

При задании граничных условий для уравнения водного баланса западная и восточная границы области решения калибровочной задачи (рис. 2а) полагались непроницаемыми; на южной и северной границах задавались условия первого рода, т.е. значения H_2 , полученные путем интерполяции (и частично экстраполяции) измерений в наблюдательных скважинах, расположенных на границе области. В общем случае решение такой калибровочной задачи может быть не единственным. Обозначим $\{\tau\}$ набор таких распределений $\tau(x, y)$. Эта многозначность является следствием недостаточной определенности задачи. Для единственности решения наложим дополнительное условие, обусловленное гидрогеологическими свойствами осадочных бассейнов. Хорошо известно, что в таких бассейнах в пределах одного водоносного горизонта латеральные изменения водопроводимости пласта ограничены. В связи с этим в качестве критерия выбора $\tau(x, y)$ из $\{\tau\}$ примем условие:

$$\Phi[\tau] = \int_{\Omega} |\nabla \tau|^2 d\omega \rightarrow \min_{\{\tau\}},$$

где Ω – область решения калибровочной задачи (показана пунктирной линией на рис. 2а).

В данной постановке калибровочная задача является задачей на поиск условного экстремума. Однако вследствие неявно заданных условий (равенство измеренных и вычисленных значений напоров) использование прямых методов определения условного экстремума с применением теоремы Куна-Таккера [7], неочевидно. Поэтому вместо поиска условного экстремума функционала Φ определялся безусловный экстремум функционала:

$$\Phi^*[\tau] = \Phi[\tau] + W \sum_{i=1}^N \{H_2(x_i^H, y_i^H) - H_i^m\}^2,$$

где W – заданная большая величина, определяющая значение добавленной к Φ функции штрафов. При $W \rightarrow \infty$ безусловный минимум Φ^* стремится к условному минимуму Φ . На точность соответствия этих двух экстремумов указывает уменьшение зависимости Φ^* от W . Вычисления показали, что зависимость Φ^* от W становится слабой при $W > 10^3$.

Краевая задача для уравнения водного баланса в Горизонте II решалась методом конечных элементов при использовании метода Галеркина в т. н. «слабой формулировке» [8]. В этом случае решение краевой задачи сводится к решению системы линейных уравнений вида:

$$\mathbf{A}\chi_2 = \beta,$$

где χ_2 – вектор значений $H_2(x, y)$ в узловых точках конечных элементов; β – вектор правых частей; матрица \mathbf{A} – симметричная и положительно определенная. Это позволило использовать для решения системы линейных уравнений быстродействующий неитерационный метод Холецкого. Минимум Φ^* определялся градиентным методом с контролем сходимости. Полученные из решения калибровочной задачи распределения $\tau(x, y)$ и $\sigma_3(x, y)$ приведены на рис. 3. Отметим, что узкие области повышенных значений параметра перетекания, особенно в северной части, практически трассируют русло р. Б.Тель, положение которого частично согласуется с линиями тектонических нарушений. Такое совпадение служит еще одним подтверждением достоверности расчетов.

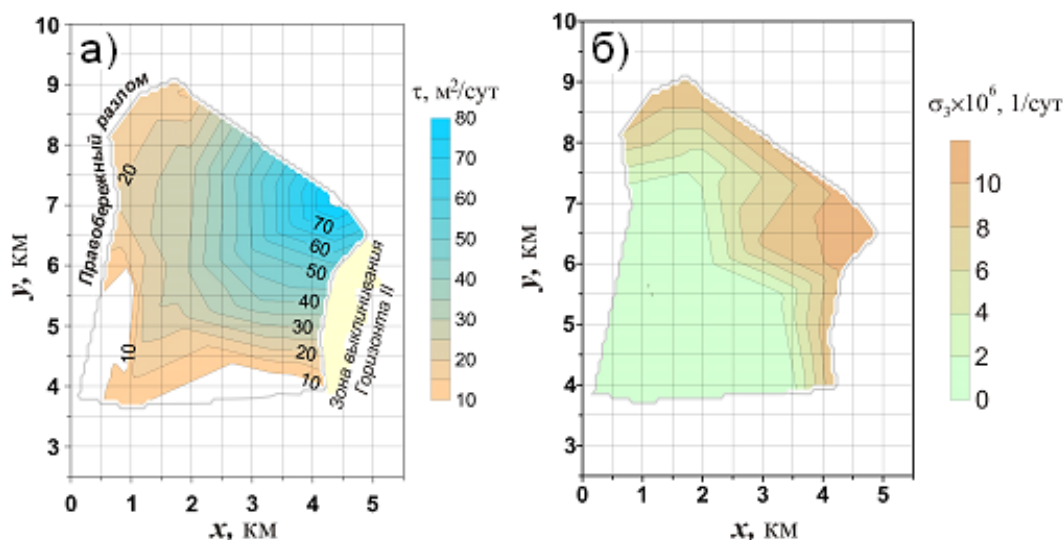


Рис. 3. Распределение водопроводимости Горизонта II (а) и параметра перетекания через водоупорный слой между Горизонтами II и III (б) в плановых координатах.

Сопоставление полученных при решении калибровочной задачи и измеренных значений $\tau(x, y)$ и $H_2(x, y)$ приведено в таблице 1. Систему конечных элементов выбирали таким образом, что положения скважин, в которых проводились откачки, совпадали с вершинами соответствующих конечных элементов. Поэтому точное значение водопроводимости в

этих вершинах задавалось явным образом. Таким образом, значения водопроводимости в точках расположения измерительных скважин, полученные из решения калибровочной задачи, автоматически равны измеренным значениям. Решение калибровочной задачи получено на основе разработанной в ИГЕМ РАН компьютерной программы, реализующей описанный выше метод. Полученное распределение $H_2(x, y)$ и рассчитанные на основании этого распределения компоненты скорости фильтрации использовались для моделирования переноса загрязнения подземными водами в Горизонте II из зоны закачки ЖРО.

Таблица 1. Расчетные и измеренные значения напора и водопроводимости в Горизонте II.

Скважина	Напор, м		Водопроводимость, м ² /сут	
	Расчетное	Измеренное	Расчетное	Измеренное
С-1	172.26	174.11	17.5	17.5
С-3	153.63	153.63	25.1	25.1
С-6	192.30	192.30	14.4	14.4
С-10	174.19	174.19	0.8	0.8
С-15	164.06	164.69	70.9	70.9
С-16	154.38	154.38	55.3	55.3
П-6	173.87	172.21	24.9	24.9
П-7	176.37	173.61	15.8	15.8
П-13	169.77	169.96	17.6	17.6
П-15	168.45	169.17	38.9	38.9

Моделирование осуществлялось путем решения уравнения адвекционно-дисперсионного переноса загрязнения с учетом осаждения компонентов загрязнения на вмещающих породах и распада радиоактивных компонентов загрязнения. Уравнение записывается в виде:

$$[\varphi\rho + (1-\varphi)\rho_r K_d] \frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(d_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + d_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(d_{xy} \frac{\partial C}{\partial x} + d_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \kappa[\varphi\rho + (1-\varphi)\rho_r K_d] C.$$

Здесь φ – пористость пород Горизонта II; ρ и ρ_r – плотности пластовых вод и пород Горизонта II, соответственно; K_d – коэффициент распределения радионуклида; C – массовая концентрация (равная отношению концентрации радионуклидов в подземных водах к их максимальной концентрации в Горизонте II в 2000 году); κ – константа радиоактивного распада; t – время; d_{xx}, d_{xy}, d_{yy} – компоненты тензора гидродинамической дисперсии и диффузии. Выражения для этих компонент имеют вид:

$$d_{xx} = \rho D \varphi \theta + \rho(\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x^2}{v} + \rho \alpha_T v; \quad d_{yy} = \rho D \varphi \theta + \rho(\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_y^2}{v} + \rho \alpha_T v;$$

$$d_{xy} = \rho(\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_y}{v}; \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии; θ – параметр, характеризующий извилистость каналов фильтрации в Горизонте II; α_L, α_T – соответственно, продольный и поперечный линейные параметры дисперсии.

Расчеты миграции радионуклидов в Горизонте II проводились с помощью универсального программного продукта JDB-MOC (GeoChem Software, Inc., 1995). Этот пакет был разра-

ботан для двумерных плановых моделей течения подземных вод и переноса ими загрязнения. Способ решения уравнения переноса в этом пакете основан на т.н. «методе характеристик» [9]. Он не учитывает роль архимедовых сил, обусловленных неоднородностью распределений температур и солености подземных вод, однако влияние этих сил на движение ореола загрязнения в Горизонте II незначительно вследствие малой (по сравнению с ЖРО в Горизонте I) активности ЖРО, закачивавшихся в Горизонт II. Соленость последних не превышала 10 г/л [6]. По этой причине использование пакета JDB-MOC для расчета прогноза распространения радиоактивного загрязнения в Горизонте II вполне допустимо. Исходное положение и форма загрязнения в Горизонте II определялись из описания полигона «Северный» [2] и характера загрязнения по результатам тритиевого анализа (рис. 4а).

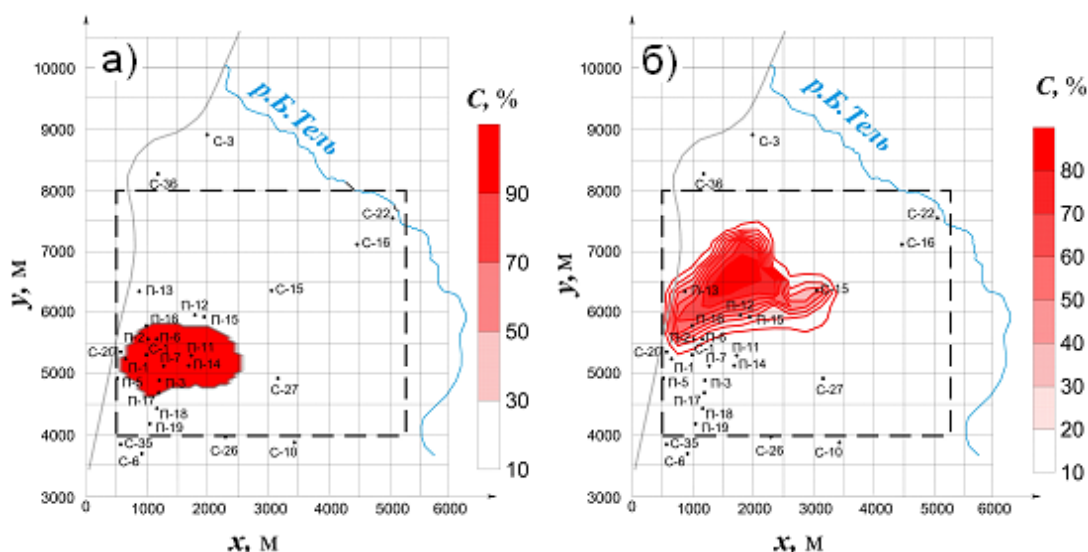


Рис. 4. Положение загрязнения в 2000 году по данным тритиевого анализа (а) и прогнозные распространение загрязнения, связанного с несорбируемыми радионуклидами, к 2100 году (б). Данные приведены в процентах от максимальной концентрации. Изолинии соответствуют процентам максимальной исходной концентрации загрязнения.

С учетом данных работы [2] расчет проводился при следующих значениях параметров среды: пористость пород горизонта принималась за 0.1 (10%), продольный коэффициент динамической дисперсии α_L составляет 30 м. Это согласуется с приведенными в работах [10, 11] значениями для неконсолидированных осадочных пород. Отношение коэффициента поперечной дисперсии α_T к α_L принималось как 0.3 в соответствии с рекомендациями [12]. Величины коэффициентов молекулярной диффузии в водных растворах электролитов не превышают $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Скорости течения подземных вод в Горизонте II имеют порядок 10 м/год. Из выражений для компонент тензора дисперсии-диффузии следует, что доля этих величин не превышает 0.3%. По этой причине молекулярной диффузией в расчетах можно пренебречь. Результаты расчета максимального распространения загрязнения через 100 лет (к 2100 году) приведены на рис. 4б. Скорость движения несорбируемых компонент загрязнения (в том числе ^3H) составляет 15 м/год. По пессимистическим оценкам время попадания ^3H в реку Б. Тель (приток Енисея) составит 250 лет, что более чем в 20 раз, превышает период полураспада ^3H (12 лет). Значения коэффициентов задержки некоторых радионуклидов, входящих в состав наиболее подвижных кислотных ЖРО приведены в

таблице 2. Коэффициент задержки показывает во сколько раз скорость миграции радионуклида ниже, чем скорость потока подземных вод. Для сорбируемых радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr – основной компоненты радиоактивного загрязнения подземных вод полигона «Северный» [6], скорости миграции в породах значительно меньше, по сравнению с тритием. Время попадания в Енисей составит 1500–2250 лет для ^{90}Sr и 3250 лет для ^{137}Cs , что, с учетом периодов полураспада, приведет к их практически полному исчезновению.

Таблица 2. Коэффициенты задержки радионуклидов из кислотных ЖРО породами [6].

Радионуклид	Период полураспада, лет	Коэффициент задержки
^{90}Sr	29	6–9
^{137}Cs	30	13
^{239}Pu	24 065	13–30

Помимо полигона «Северный» на ГХК в еще больших объемах (50 млн. м^3 с 1963 года) закачка ЖРО проводилась на Сибирском химическом комбинате (СХК, Томская область). Вынос радионуклидов из зоны закачки приведет к радиоактивному загрязнению реки Томь (приток Оби) с последующим поступлением радионуклидов в воды и донные отложения Обской губы и Карского моря Арктики. Геологическая среда участка закачки ЖРО на СХК сходна с обстановкой полигона «Северный», что позволяет применить для расчета прогноза распространения загрязнения в этом районе ту же методику, что использована для ГХК. Заметная часть радионуклидов, например Pu, переносится подземными водами в коллоидной форме, которая является более мобильной, а, значит, и опасной, чем радионуклиды, содержащиеся в подземных водах в виде растворенной компоненты. В дальнейшем будут разработаны теоретические методы, учитывающие поправку к прогнозам распространения радиоактивного загрязнения, связанную с коллоидной формой переноса радионуклидов. Работа выполнена по программе Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

1. Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2014.
2. А.И. Рыбальченко, М.К. Пименов, П.П. Костин и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994.
3. М.К. Пименов, А.И. Рыбальченко, В.М. Курочкин и др. Фундаментальные аспекты захоронения РАО в геологических формациях. М.: Граница, 2013. 107–109.
4. В.И. Мальковский, А.А. Пэк. *Геоэкология*, 2012, **3**, 237–244.
5. В.А. Мироненко. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1996.
6. K.L. Compton, V. Novikov, F.L. Parker. Deep well injection of liquid radioactive waste at Krasnoyarsk-26. Laxenburg: International Institute for Applied System Analysis, 2000.
7. В.М. Алексеев, В.М. Тихомиров, С.В. Фомин. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979.
8. О. Зенкевич, К. Морган. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986.
9. L.F. Konikow, J.D. Bredehoeft. Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey. Alexandria, Virginia, USA. 1978.
10. Ж. Фрид. Загрязнение подземных вод. 1981.
11. G. deMarsily. Quantitative hydrogeology. Orlando, Florida: Academic Press, 1986.
12. R.A. Freeze, J.A. Cherry. Groundwater. New Jersey: Prentice Hall, 1979.