

Радиоактивное загрязнение поверхностных вод в техногенных ландшафтах Южной Якутии

А. П. ЧЕВЫЧЕЛОВ, А. П. ДЬЯЧКОВСКИЙ, П. И. СОБАКИН, Л. И. КУЗНЕЦОВА

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН
677980, Якутск, просп. Ленина, 41
E-mail: chev.soil@list.ru*

АННОТАЦИЯ

На примере ручья Пропадающего, дренирующего радиоактивные отвалы участка Курунг-1 (шахта 2) месторождения Южное, изучен химический состав и оценена степень радиоактивного загрязнения поверхностных вод в Эльконском ураново-рудном районе на территории Южной Якутии. Отмечено, что основным источником техногенного загрязнения поверхностных вод в данном районе являются радиоактивные отвалы горных пород, вынесенных в зону гипергенеза в результате проведения длительных и широкомасштабных геолого-поисковых работ на радиоактивное сырье.

Ключевые слова: техногенные ландшафты, поверхностные воды, химический состав, радиоактивное загрязнение, естественные радионуклиды.

Поверхностные воды криолитозоны в радиационном отношении являются малоизученными компонентами мерзлотных ландшафтов. Наши исследования проводились на территории Эльконского ураново-рудного района (ЭУРР). Данный район расположен в центральной части Алданского нагорья на территории Южной Якутии в пределах средне-таежной подзоны мерзлотно-таежной области бореального пояса Восточной Сибири. В геоморфологическом отношении ЭУРР приурочен к Эльконскому горсту. Эльконский горст представляет собой выступ кристаллических пород фундамента, полностью лишенный осадочных отложений. Рельеф поверхности горста в основном крутосклонный и среднегорный. Это складчато-глыбовое ступенчатое нагромождение, максимальная высота которого 1498 м (голец Медвежий).

Кристаллический фундамент этой территории сложен ниже- и верхнеархейскими гнейсами, кристаллическими сланцами, кварцитами и гранитоидами. Здесь выявлено несколько десятков урановых месторождений и рудопроявлений. Браннерит – основной рудный минерал – распределен в руде неравномерно [1].

Климат исследуемой территории резко континентальный, холодный гумидный и супергумидный, растительность – главным образом средне- и верхнетаежная лиственничная тайга и горные тундры. Почвенный покров в автоморфных позициях представлен маломощными каменистыми и щебнистыми кислыми почвами элювиального ряда – подбурами и подзолистыми альфегумусовыми. Многолетняя мерзлота распространена неравномерно и носит прерывистый характер. Все вышеназванные ландшафтно-климатические и эдафические особенности Эльконского горста позволяют утверждать, что водная миграция элементов в ландшафтах здесь проис-

Чевычелов Александр Павлович
Дьячковский Алексей Петрович
Собакин Петр Иннокентьевич
Кузнецова Любовь Ивановна

ходит в условиях крутосклонового горного рельефа, провальной фильтрации, промывного и окислительного режимов почвогрунтов [2]. Последнее предполагает формирование в данном регионе широкомасштабных и интенсивных радиоактивных загрязнений поверхностных вод в техногенных зонах. Выявление особенностей химического состава данных вод и оценка степени их радиоактивного загрязнения естественными радионуклидами (^{238}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn) – цель данной работы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование масштабов и степени радиоактивного загрязнения поверхностных вод ЭУРР проведено нами на территории месторождения Южное (рис. 1) на примере руч. Пропадающего, дренирующего наиболее активные отвалы участка Курунг-1 (шахта 2). Здесь в последней трети XX в. проведены широкомасштабные геолого-поисковые работы на радиоактивное сырье. По данным Госатомнадзора Дальневосточного округа РФ [3], на территории ЭУРР в ходе почти 25-летнего периода проведения данных работ извлечено из недр и складировано на дневную по-

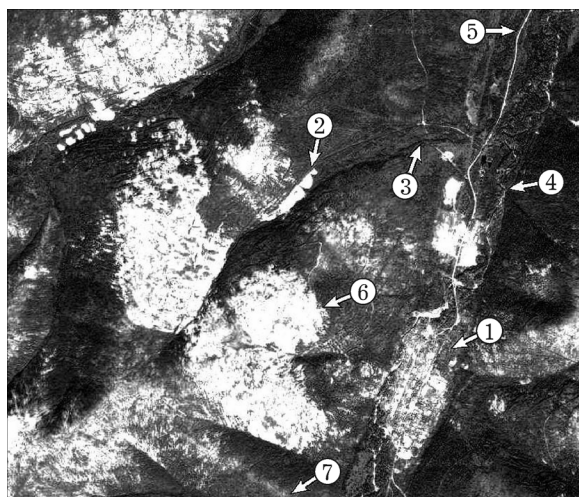


Рис. 1. Фрагмент космического снимка территории месторождения Южное.

1 – пос. Заречный; 2 – участок Курунг-1 (шахта 2); 3 – руч. Пропадающий; 4 – р. Курунг; 5 – дорога пос. Заречный – г. Томмот; 6 – тундрогольцы и каменные пустоши; 7 – водораздельные склоны с горно-таежной растительностью

верхность в отвалы более 1 млн т рудной массы. Общее количество урана, содержащегося в ней, – ~ 2000 т, что позволяет предполагать значительные масштабы радионуклидного загрязнения территории. Поскольку данные радиоактивные отвалы горных пород находятся в области гипергенеза уже почти 40 лет, зоны техногенного загрязнения, фиксируемые по аномальным значениям содержания естественных радионуклидов в составе поверхностных вод, занимают здесь, вероятно, значительные площади.

Пробы воды руч. Пропадающего отбирали как выше, так и ниже по течению от радиоактивных отвалов на фиксированных расстояниях (через 500 м) от источников загрязнения. Фиксация точек отбора осуществлялась с помощью мерной ленты вдоль русла данного ручья. Помимо этого отбирали также пробы вод рек Курунга, Элькона и Алдана естественных ландшафтов, находящихся вне зон техногенного загрязнения. Определение содержания урана в воде выполнено лазерно-люминесцентным методом на флуорометре АУФ-101 “Ангара”, радия и радона – эманионным (радиохимическим) методом. При этом измерение активности ^{226}Ra произведено на приборе “Альфа-1М”, а объемной активности ^{222}Rn (ОАР) – с помощью радиометра типа РРА-01М-01 по стандартным методикам, принятым в геологии и радиоэкологии [4, 5]. Определение рН, минерализации и ионного состава вод выполнено по общепринятым в гидрохимии методикам, при этом точность методов определения большей части компонентов, как правило, не превышала 10–15 % [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые воды по значениям их общей минерализации, согласно известным градам [7], – ультрапресные, а по составу ионов воды нативных ландшафтов – гидрокарбонатно-кальциевые, тогда как таковые техногенных ландшафтов – сульфатно-кальциевые (табл. 1). Увеличение содержания сульфатов в воде руч. Пропадающего в зоне влияния радиоактивных отвалов обусловлено окислением сульфидных мине-

Ионный состав поверхностных вод техногенных и естественных ландшафтов Южной Якутии

| Место отбора проб | рН | Ионы, мг/л / мг-экв./л | | | | | | | Сумма ионов, мг/л |
|--|-----|------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|
| | | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Na ⁺ | K ⁺ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | |
| <i>Техногенные ландшафты</i> | | | | | | | | | |
| Руч. Пропадающий: | | | | | | | | | |
| начало отвалов | 7,7 | 5,8 | 1,9 | 4,0 | 1,0 | 12,8 | 20,7 | 0,3 | 46,5 |
| | | 22,3 | 12,3 | 13,4 | 2,0 | 16,2 | 33,1 | 0,7 | |
| 500 м ниже отвалов | 6,9 | 9,4 | 3,9 | 4,0 | 1,0 | 15,3 | 35,1 | 0,3 | 69,0 |
| | | 23,7 | 16,2 | 8,8 | 1,3 | 12,6 | 36,9 | 0,5 | |
| 1000 м ниже отвалов | 6,7 | 8,2 | 3,4 | 3,0 | 1,0 | 14,6 | 28,7 | 0,3 | 59,2 |
| | | 24,2 | 16,6 | 7,7 | 1,5 | 14,2 | 35,3 | 0,5 | |
| 1500 м ниже отвалов | 6,7 | 7,6 | 3,7 | 3,0 | 1,0 | 14,0 | 28,7 | 0,3 | 58,3 |
| | | 22,7 | 17,9 | 7,8 | 1,6 | 13,7 | 35,7 | 0,6 | |
| Р. Курунг, выше устья руч. Пропадающего | 6,6 | 9,6 | 3,4 | 4,0 | Сл.* | 21,9 | 26,7 | 0,7 | 66,3 |
| | | 25,7 | 15,0 | 9,3 | | 19,3 | 29,7 | 1,0 | |
| <i>Естественные ландшафты</i> | | | | | | | | | |
| Р. Курунг, среднее течение | 7,4 | 7,8 | 2,8 | 2,0 | Сл. | 20,7 | 13,4 | 3,0 | 49,7 |
| | | 27,5 | 16,2 | 6,3 | | 23,9 | 20,1 | 6,0 | |
| Р. Элькон, нижнее течение | 7,8 | 16,2 | 6,6 | 3,0 | 1,0 | 51,9 | 27,6 | 3,0 | 109,3 |
| | | 26,8 | 17,9 | 4,3 | 1,0 | 28,2 | 19,0 | 2,8 | |
| Р. Алдан, г. Томмот | 7,4 | 20,4 | 8,1 | 6,0 | 1,0 | 86,6 | 23,7 | 2,3 | 148,1 |
| | | 25,8 | 16,9 | 6,6 | 0,7 | 35,8 | 12,5 | 1,7 | |

*Следовое количество иона.

ралов – спутников урана в условиях окислительной обстановки. По сути, здесь в водных растворах происходит образование слабоконцентрированной серной кислоты, вследствие чего значения рН данных вод снижаются (точки 2–5) примерно на единицу по сравнению с фоном (точка 1). Вследствие растворения минералов слабовыветрелых горных пород отвалов, вынесенных в зону гипергенеза, в данных точках происходит увеличение минерализации вод на 12,7–22,5 мг/л (см. табл. 1).

Исследуемые радионуклиды в процессе водной миграции по-разному отражают масштабы и степень техногенного загрязнения в зоне влияния радиоактивных отвалов (табл. 2). Так, ²³⁸U в максимальной концентрации здесь обнаружен в 500 м, а ²²⁶Ra – в 1000 м от начала отвалов, в то время как ²²²Rn в максимальном количестве зафиксирован в самом начале отвалов. Техногенная концентрация ²³⁸U в водах руч. Пропадающего (Кк = 11–100) численно сопоставима с

таковой для ²²²Rn (Кк = 2–198). В наименьшей степени в данных водах в зоне загрязнения увеличивается (Кк = 3,7–7,8) содержание ²²⁶Ra. При расчете значений Кк использовали отношение содержания радионуклида в точке обследования радиоактивных отвалов (см. табл. 2) техногенного ландшафта к минимальной концентрации последнего, отмечаемой в водах естественных ландшафтов. При этом за фоновые концентрации данных радионуклидов приняты следующие: для ²³⁸U – $1,8 \cdot 10^{-7}$ г/л, ²²⁶Ra – $0,6 \cdot 10^{-12}$ г/л, ²²²Rn – 1,3 Бк/л. Как видно (табл. 2), на всем обследованном 1,5 км отрезке руч. Пропадающего вплоть до его устья (см. рис. 1) фиксируется влияние техногенного загрязнения и концентрации радионуклидов здесь все еще не выходят на их фоновый уровень. Но аналогичные работы, проведенные на территории ЭУРР на других водотоках, показывают, что влияние техногенного загрязнения по содержанию радионуклидов в водах фиксируется,

Содержание радионуклидов в поверхностных водах техногенных и естественных ландшафтов Южной Якутии

| Место отбора проб | ^{238}U , $n \cdot 10^{-7}$ г/л | ^{226}Ra , $n \cdot 10^{-12}$ г/л | ^{222}Rn , Бк/л | Ra : U |
|-------------------------------|--|--|--------------------------|---------------------|
| <i>Техногенные участки</i> | | | | |
| Руч. Пропадающий: | | | | |
| начало отвалов | <u>140</u> | <u>2,2</u> | <u>256,8</u> | $1,6 \cdot 10^{-7}$ |
| | 78 | 3,7 | 198 | |
| 500 м ниже отвалов | <u>180</u> | <u>2,6</u> | <u>44,8</u> | $1,4 \cdot 10^{-7}$ |
| | 100 | 4,3 | 34 | |
| 1000 м ниже отвалов | <u>93</u> | <u>4,7</u> | <u>10,7</u> | $5,0 \cdot 10^{-7}$ |
| | 52 | 7,8 | 8 | |
| 1500 м ниже отвалов | <u>20</u> | – | <u>2,5</u> | – |
| | 11 | | 2 | |
| <i>Естественные ландшафты</i> | | | | |
| Руч. Пропадающий, | 1,8 | 2,0 | – | $110 \cdot 10^{-7}$ |
| 500 м выше начала отвалов | | | | |
| Р. Курунг, среднее течение | 3,3 | 0,7 | 3,5 | $21 \cdot 10^{-7}$ |
| Р. Элькон, нижнее течение | 2,3 | 0,6 | 1,3 | $25 \cdot 10^{-7}$ |
| Р. Алдан, г. Томмот | 4,6 | 0,6 | 1,5 | $13 \cdot 10^{-7}$ |

П р и м е ч а н и е. Над чертой приведено содержание радионуклида, под чертой – значение коэффициента концентрации (Кк), прочерк – не определено.

как правило, на расстоянии до 2 км от радиоактивных отвалов, а иногда и более.

Рассчитаны также радио-урановые отношения для вод как радиоактивно-загрязненных, так и естественных ландшафтов (см. табл. 2). При этом значения отношения Ra : U для фоновых вод изменяются в пределах $13\text{--}110 \cdot 10^{-7}$, а для техногенно-загрязненных – $1,4\text{--}5,0 \cdot 10^{-7}$, т. е. в целом в 10–20 раз меньше. Это обстоятельство требует детальной оценки. Согласно известной геохимической классификации элементов [8] по особенностям гипергенной миграции, Ra более подвижен, чем U, поэтому отношение радиоактивного равновесия ($\text{Ra} : \text{U} = 3,4 \cdot 10^{-7}$), характерное для ненарушенных первичных минералов земной коры [9], сохраняется только для закрытых систем. Вследствие этого в истоках ручьев, питающихся водами выщелачивания, отношение Ra : U обычно превышает равновесное, иногда в несколько раз, за счет более интенсивного выщелачивания Ra по сравнению с U. Последнее положение абсолютно подтверждается нашими данными, полученными для вод фоновых ландшафтов (см. табл. 2).

Совсем по-иному складывается геохимическая обстановка водной миграции в зоне техногенного загрязнения руч. Пропадающего, где отношение Ra : U в 10–20 раз меньше по сравнению с фоном. По нашему мнению, это объясняется двумя причинами. Во-первых, учитывая ионный состав данных вод (см. табл. 1) и относительное увеличение в их составе сульфатов, а также геохимические особенности Ra как щелочно-земельного элемента, нужно полагать, что в радиоактивно-загрязненных водах он мигрирует главным образом в солевой форме, т. е. в виде соединений RaSO_4 и RaCO_3 . Известно [9], что RaSO_4 нерастворим в воде, поэтому там, где создаются условия для образования сульфата радия, Ra выпадает в осадок. Очень мало растворим RaCO_3 . Уран на первом этапе своей водной миграции из пород отвалов, скорее всего, будет выщелачиваться в виде легкоподвижных соединений: в виде легкорастворимых сульфата уранила и комплексных карбонатов. Далее, поступая в таежно-мерзлотные ландшафты, U, крайне склонный к комплексообразованию с органическими кислотами, мигрируя в ультрапресных водах

кислого класса, образует легкоподвижные гуматы, в особенности фульваты уранила. Последнее утверждение более очевидно, если напомнить, что, согласно А. И. Перельману [7], в водах горной тайги Якутии растворенное органическое вещество (РОВ) составляет от 10 до 75 % от общей суммы растворенных веществ, а главным компонентом РОВ являются фульвокислоты, содержание которых в 5–6 раз превышает таковое гуминовых кислот [10]. Во-вторых, Ra обладает крайне низким кларком и относится к ультрамикроэлементам [8]. Поэтому в данных водах его слабая миграция, осуществляемая в основном в ионной форме, будет дополнительно подавляться присутствием в водных растворах более подвижных щелочных (Na^+) и щелочно-земельных (Ca^{+2}) катионов. Поэтому радиоактивные породы отвалов на начальных этапах гипергенного выветривания относительно обогащаются Ra по сравнению с U, который выщелачивается более активно. В экологическом отношении это обстоятельство в целом может рассматриваться как негативное для гидробиоты и водной растительности, так как U является высокотоксичным радиоактивным элементом [8]. Таким образом, в техногенных зонах таежно-мерзлотных ландшафтов основная часть U активно мигрирует в составе комплексных соединений фульватов уранила. Часть U закрепляется в аллювиальных почвах и донных отложениях в составе органического вещества. Последнее положение хорошо подтверждается данными табл. 3, полученными в процессе исследований. Для этого в непосредственной близости от отвалов отбирали илистые отложения, обогащенные в разной степени органическим веществом, и определяли в них содержание естественных радионуклидов. Результаты этих работ показали, что содержание урана в илистых донных отложениях зависит от концентрации в них органического вещества (см. табл. 3), возрастая с увеличением содержания последнего. Величина коэффициента корреляции между содержанием урана и органического вещества составила 0,95 и статистически достоверна при $P = 0,95$. Что касается радия, то между концентрацией этого радионуклида и содержанием органического вещества в донных отложениях

Т а б л и ц а 3
Доля естественных радионуклидов
и органического вещества в донных отложениях
ручья Пропадающего, %

| Номер образца | Органическое вещество | ^{238}U , $n \cdot 10^{-4}$ | ^{226}Ra , $n \cdot 10^{-11}$ |
|---------------|-----------------------|--------------------------------------|--|
| 1 | 14,1 | 730 | 54 |
| 2 | 6,2 | 480 | 45 |
| 3 | 1,8 | 340 | 76 |
| 4 | 1,4 | 290 | 40 |
| 5 | 1,2 | 250 | 59 |
| 6 | 0,9 | 150 | 75 |

ях не выявлено статистически достоверных корреляционных связей.

На рис. 2 отображена функция аппроксимации зависимости объемной активности ^{222}Rn в воде руч. Пропадающего от расстояния до радиоактивных отвалов, которая имеет экспоненциальный характер. Расчет осуществлен способом наименьших квадратов. Высокое, предельно близкое к единице значение коэффициента корреляции ($r = 0,999$) указывает на высокую достоверность полученного алгоритма (см. рис. 2). При этом на отрезке русла данного ручья длиной 1000 м концентрация ^{222}Rn резко падает, уменьшаясь почти в 25 раз. Такое резкое уменьше-

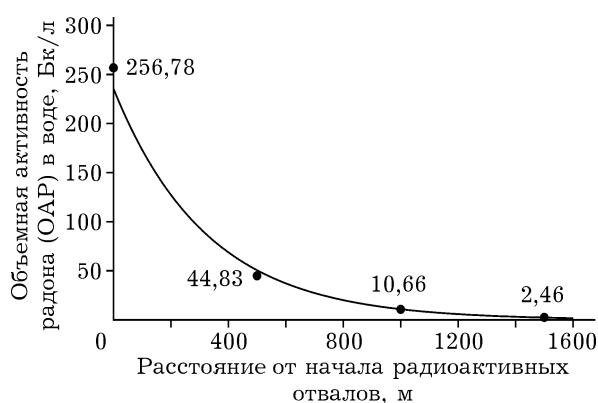


Рис. 2. График зависимости содержания радона в воде руч. Пропадающего на различном расстоянии от источников техногенного загрязнения.

Точки – значения ОАР в воде руч. Пропадающего, кривая – экспоненциальная зависимость: $y = 235,53e^{-0,0031x}$, где y – значение ОАР, а x – расстояние от отвалов

ние содержания ^{222}Rn , по нашему мнению, объясняется мелким каменистым крутопадающим руслом руч. Пропадающего, в конечном счете обуславливающим быстрый и турбулентный характер потока воды. Известно, что в естественных водных потоках турбулентность является существенным фактором дегазации [9].

Фоновое содержание ^{222}Rn в речных приречных водах довольно вариабельно и изменяется от 0,01 до 30 Бк/л, в то время как в радоновых водах некоторых европейских месторождений сульфатного класса с минерализацией 0,3–1,0 г/л оно варьирует в пределах 74–4070 Бк/л [9]. Полученные нами данные (см. табл. 2) по концентрации ^{222}Rn в водах как нативных, так и радиоактивно-загрязненных ландшафтов мерзлотной области в большей степени приближаются к нижним пределам вышеприведенных величин. Поэтому предварительно можно констатировать пониженный характер концентраций ^{222}Rn в речных водах таежно-мерзлотных ландшафтов, несмотря на повышенную радиоактивность коренных магматических пород Алданского щита. Данный факт мы склонны объяснять наличием в исследуемых ландшафтах многолетнемерзлых горных пород, низкими температурами почвогрунтов и речных вод. Известно, что с повышением температуры наблюдается резкое возрастание эманлирующей способности твердых веществ, а также кинетики массопереноса ^{222}Rn из газовой фазы в жидкую [9]. Естественно, что с понижением температуры скорость данных процессов будет падать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техногенез – это совокупность геохимических процессов, связанных с деятельностью людей, которая сопровождается извлечением из окружающей среды, концентрацией и перегруппировкой химических элементов. Прогноз влияния техногенеза и обоснование методов защиты природной среды от загрязнения должны базироваться на знании законов миграции химических элементов в различных природных геохимических обстановках поверхности Земли [11]. В этом контексте на основе проведенных

исследований, можно сделать следующие выводы:

1. В отличие от гидрокарбонатно-кальциевого типа речных вод естественных ландшафтов химический состав радиоактивно-загрязненных вод характеризуется главным образом как сульфатно-кальциевый. В них снижаются значения рН и увеличивается минерализация.

2. Максимальные значения содержания урана, радия и радона в изученных водах соответственно составляют $180 \cdot 10^{-7}$ г/л, $4,7 \cdot 10^{-12}$ г/л и 256,8 Бк/л, что в 100, 8 и 198 раз превышает их фоновые концентрации в водах естественных ландшафтов. При этом техногенное загрязнение фиксируется на расстоянии до 2 км от радиоактивных отвалов горных пород.

3. Отмечается уменьшение значений отношения $\text{Ra} : \text{U}$ в 10–20 раз в водах техногенных ландшафтов по сравнению с таковыми естественных в связи с увеличением в них подвижности U по сравнению с Ra. Это в целом может рассматриваться как негативное обстоятельство по отношению к гидробиоте и водной растительности в связи с высокой токсичностью урана.

4. Зависимость объемной активности ^{222}Rn (y) в водах техногенных ландшафтов от расстояния до радиоактивных отвалов (x) имеет экспоненциальный характер и аппроксимируется следующей функцией: $y = 235,53e^{-0,0031x}$ с высокой степенью достоверности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 09–04–98501 р_восток_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чевычелов А. П., Собакин П. И. Миграция естественных радионуклидов в техногенных таежно-мерзлотных ландшафтах Южной Якутии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
2. Чевычелов А.П., Собакин П.И., Ушницкий В.Е. Ландшафтно-климатические и почвенно-геохимические условия миграции естественных радионуклидов в ландшафтах зоны урановых месторождений Центрального Алдана (Южная Якутия)//Вестник Том. гос. ун-та. Приложение. 2003. 3(IV). С. 312–314.
3. Бурцев И. С., Степанова С. К. и др. Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия). Якутск, 2004. С. 56–67.
4. Рекомендации. М., 2006. С. 3–8.

5. Методические рекомендации / под ред. А. А. Смылова. М.: Мингео СССР, 1974.
6. Семенов А. Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977.
7. Перельман А. И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982.
8. Перельман А. И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989.
9. Гудзенко В. В., Дубиничук В. Т. Изотопы радия и радона в природных водах. М.: Наука, 1987.
10. Никитина И. Б. Геохимия ультрапресных вод мерзлотных ландшафтов. М.: Наука, 1977.
11. Глазовская М. А. Биогеохимические циклы в биосфере. М.: Наука, 1976. С. 99–119.

Radioactive Pollution of Surface Waters in the Anthropogenic Landscapes of South Yakutia

A. P. CHEVYCHELOV, A. P. DYACHKOVSKY, P. I. SOBAKIN, L. I. KUZNETSOVA

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
677980, Yakutsk, Lenin ave., 41
E-mail: chev.soil@list.ru*

Chemical composition of Propadayushchiy Stream that drains radioactive waste piles at the Kurung 1 Site (Mine 2) of Yuzhnoye deposit has been studied and the level of radioactive pollution of surface waters in the Elkon ore-bearing region within the territory of South Yakutia has been estimated. We found that the main source of anthropogenic pollution of surface waters in this region is radioactive waste piles which appeared in the zone of hypergenesis because of long-term and large-scale geological surveys for radioactive raw material.

Key words: surface waters, anthropogenic landscapes, radioactive pollution, natural radionuclides, chemical composition.