

УДК 577.4:546.212:504.4.054

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОДЫ ОБЪЕКТОВ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Есильканов Гани Мухтарович¹,
gme1@tpu.ru

Лукашенко Сергей Николаевич²,
lukashenko@nnc.kz

Рихванов Леонид Петрович¹,
rikhvanov@tpu.ru

Койгельдинова Мадина Талгатовна²,
koigeldinova@nnc.kz

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич²,
mukhamediyarov@nnc.kz

Шакенов Ербол Зеилгазинович²,
shakenov@nnc.kz

Темиржанова Арай Ермаковна²,
temirzhanova@nnc.kz

Яковенко Юлия Юрьевна²,
yakovenko@nnc.kz

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт радиационной безопасности и экологии,
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2.

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения современных данных о концентрации химических элементов в воде объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Данная информация требуется для выявления потенциально опасных элементов, которые могут влиять на здоровье населения, проживающего на данной территории.

Цель работы: изучение особенностей элементного состава вод объектов водопользования, используемых населением, проживающим на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона.

Методы исследования. Элементный состав воды определялся методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Elan 9000 «Perkin Elmer SCIEX»), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой («iCAP 6300 Duo» Thermo Scientific). Анализ таких показателей, как общая минерализация, содержание сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, магния и натрия, проводился титриметрическими, колориметрическими, потенциометрическими методами в соответствии с ГОСТ.

Результаты. Вода объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона разнообразна по химическому составу. Из всех исследуемых проб воды 26 % гидрокарбонатно-натриево-магниевый состав, 58 % сульфатно-натриево-магниевый и сульфатно-натриево-кальциевый состав, 15 % хлоридно-натриево-магниевый состав. При изучении макрокомпонентного состава воды было выявлено, что гидрокарбонатные воды близки по составу к подземным водам зоны гипергенеза. Исследуемые сульфатные и хлоридные воды сходны по составу с водами зоны континентального засоления. Для выявления особенностей элементного состава подземных вод бывшего Семипалатинского испытательного полигона построены убывающие ряды превышений средних концентраций элементов в воде по отношению к составу вод зон гипергенеза и континентального засоления: $U_{15} > Mo_{13} > Sr_{10}$ (зона гипергенеза), $Mo_3 > U_5 > Sr_3$ (зона континентального засоления). Из этого следует, что для подземных вод бывшего Семипалатинского испытательного полигона выявлены специфические элементы, такие как U, Mo, Sr. В воде 51 % всех исследуемых объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона обнаружены повышенные содержания U от 1 до 8 ПДК (ПДК_U = 15 мкг/л). Обнаруженные повышенные содержания Sr в подземных водах могут быть объяснены наличием на территории Казахстана стронциевой гидрогеохимической провинции. Таким образом, выявленные повышенные содержания молибдена, урана и стронция в водах объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона связаны с природно-климатическими особенностями региона.

Ключевые слова:

Семипалатинский испытательный полигон, вода, подземные воды, объекты водопользования, тяжелые металлы, химический состав.

Введение

В настоящее время территория бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) представляет собой место постоянного или периодического проживания населения, основной деятельностью которого является скотоводство. По этой причине важна информация о безопасности проживания населения на данной территории. Ранее проведенные исследования посвящены изучению преимущественно радиоактивного загрязнения СИП. Однако требуется информация о нерадикационных факторах воздействия на здоровье людей (концентрация тяжелых металлов и токсичных элементов) во избежание формирования некорректных выводов о влиянии СИП на население, проживающее в его пределах.

Изучение состава воды, используемой в хозяйственно бытовых целях

Оценка качества вод объектов водопользования СИП по радиационным параметрам в течение долгого времени проводилась Институтом радиационной безопасности и экологии [1–3]. В исследованных подземных водах не были обнаружены превышения активности техногенных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$, ^3H).

Проведенные в 2008 г. АО «Волковгеология» исследования природных вод территории СИП выявили, что средняя активность по ^{238}U в природных водах составила 0,5 Бк/л, что не превышает значений уровня вмешательства [4].

Целью данного исследования было изучение особенностей элементного состава вод объектов водопользования, используемых населением, проживающим на территории бывшего СИП.

Объекты и методы исследования

Пробоотбор воды в объектах водопользования на территории СИП проводился в летний период 2015 г. (июнь–август). Объектами опробования являлись колодцы, скважины и родники, возле действующих зимовок и летников. Общее количество проб составило около 100. Картосхема отбора проб представлена на рис. 1.

Объекты водопользования расположены на территории СИП крайне неоднородно. Исследуемые объекты условно поделены на следующие территориальные субъединицы (зоны): 1) Северная и Северо-Западная части; 2) Южная и Юго-Западная части; 3) Юго-Восточная часть. Следует отметить, что в центральной части СИП эксплуатируемые объекты водопользования не встречались.

Отбор и консервирование проб воды осуществлялось согласно общепринятым методикам [5]. При отборе проб воды из скважин проводилась предварительная откачка погружным насосом двух–трех объемов столба воды в скважине. При работе с колодцами, не оборудованными ручными и глубинными насосами, проводился отбор воды с помощью погружного пробоотборника.

При отборе проб воды проводились следующие операции: фильтрация воды с целью удаления механических примесей через бумажный фильтр «синяя лента»; консервация пробы добавлением концентрированной азотной кислоты (HNO_3) марки «о.с.ч» из расчёта 3 мл HNO_3 на 1 л пробы воды. Фильтрация и консервация проводились на месте отбора проб. Измерение pH и Eh воды проводилось на месте пробоотбора с помощью pH-метра Марк 901.

Для проведения общехимического анализа воды проводился отбор проб воды объемом 1,5 л. Пробы не консервировались и отправлялись на анализ в лабораторию. Анализ таких показателей, как общая минерализация, содержание сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, магния и натрия, проводился титриметрическими, колориметрическими, потенциометрическими методами [6].

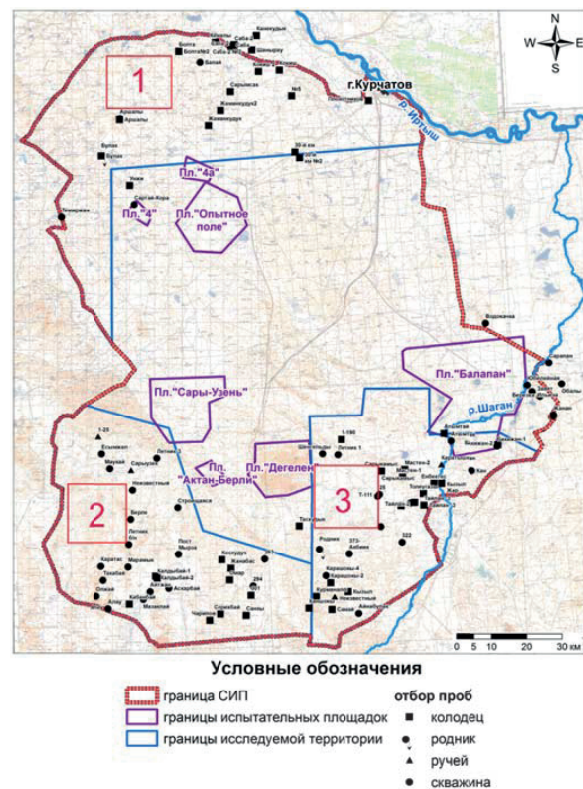


Рис. 1. Точки отбора проб воды из объектов водопользования СИП: 1 – Северная Северо-Западная часть; 2 – Южная Юго-Западная часть; 3 – Юго-Восточная часть

Fig. 1. Points of water sampling at the Semipalatinsk test site (STS) objects of water use: 1 is the Northern and Northwestern territory; 2 is the Southern and Southwestern territory; 3 is the Southeastern territory

В исследовании применялись методы масс-спектрометрии (Elan 9000 фирмы «Perkin Elmer SCIEX») и атомно-эмиссионной спектрометрии («iCAP 6300 Duo» фирмы Thermo Scientific) с индуктивно-связанной плазмой. Непосредственно перед анализом пробы воды разбавлялись 1:10 в 1 % HNO_3 .

Для построения калибровочных графиков использовались мультиэлементные стандартные растворы, зарегистрированные в реестре ГСИ РК под № KZ.03.02.00901–2010, KZ.03.02.00902–2010. Для определения изотопного состава урана методом ИСП-МС применены растворы, приготовленные на основе ГСО 7115–94 состава ионов урана (300 мг/л).

Контроль качества измерений осуществлялся путём измерения калибровочного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительном результате калировки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводилась перекалировка прибора, при которой учитывались новые параметры фона.

Анализ проведен согласно методике ISO 17294–2?2003 (E) «Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП). Часть 2: Определение 62 элементов» (номер гос. регистрации 022/10505 от 27.12.05 г.) [7].

Пробы воды были проанализированы на содержание таких элементов, как Li, Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Sr, Nb, Mo, Cd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Bi, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U, Pb.

Результаты исследования

Особенности общехимического состава воды объектов водопользования

Данные по макрокомпонентному составу представлены в табл. 1. Классификация воды объектов водопользования по химическому составу проводилась по О.А. Алекину [8].

Вода изученных объектов водопользования СИП разнообразна по химическому составу и уровню минерализации. Из всех исследуемых объектов водопользования 26 % являются пресными со средней минерализацией 0,4 г/л гидрокарбонатно-натриево-магниевого состава. Подземные воды сульфатно-натриево-магниевого и сульфатно-натриево-кальциевого состава более распространены на изученной территории (58 %) и относятся преимущественно к солоноватым водам (средняя минерализация – 1,7 г/л). Хлоридные воды менее распространены на территории СИП, из всех исследуемых подземных вод только 15 % являются солеными со средней минерализацией 3,7 г/л хлоридно-натриево-магниевого состава.

Величина pH изменяется в диапазоне 6,5–8,5; среднее значение для всех преобладающих типов

Таблица 1. Общехимический состав воды объектов водопользования СИП

Table 1. General chemical composition of water of the STS objects of water use

Элемент Element	Единица измерения Unit of measurement	Тип воды/Water type			Среднее для СИП Average for the STS $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Среднее содержание в подземных водах Mean concentration in underground water	
		Гидрокарбонатные Hydrocarbonate, n=26 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Сульфатные Sulphate, n=58 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Хлоридные Chloride, n=15 $\bar{X} \pm S$ (min-max)		зона гипергенеза hypergenesis zone [4]	зона континентального засоления continental salification zone [4]
pH	–	$\bar{7,7}$ (6,5–8,5)	$\bar{7,7}$ (6,8–8,4)	$\bar{7,7}$ (7–8,3)	$\bar{7,7}$ (6,5–8,5)	6,9	7,5
Eh	mВ mV	$\bar{0,2}$ (от –0,9 до +11)	$\bar{-0,2}$ (от –0,5 до –0,3)	$\bar{-0,2}$ (от –0,5 до +0,07)	$\bar{-0,1}$ (от –0,9 до +11)	–	–
M	г/л g/l	$\bar{0,4 \pm 0,1}$ (0,19–0,95)	$\bar{1,7 \pm 0,3}$ (0,4–18)	$\bar{3,7 \pm 0,6}$ (0,6–7,8)	$\bar{1,7 \pm 0,3}$ (0,19–18)	0,5*	1,3*
HCO ₃ ⁻		$\bar{270 \pm 40}$ (88–490)	$\bar{270 \pm 40}$ (100–680)	$\bar{260 \pm 40}$ (120–400)	$\bar{280 \pm 42}$ (88–680)	187	349
Cl ⁻		$\bar{31 \pm 5}$ (3,4–100)	$\bar{230 \pm 35}$ (20–2900)	$\bar{1300 \pm 195}$ (50–3200)	$\bar{340 \pm 51}$ (3,4–3200)	59,7	258
SO ₄ ²⁻		$\bar{110 \pm 17}$ (0–290)	$\bar{800 \pm 120}$ (180–8900)	$\bar{960 \pm 144}$ (150–1800)	$\bar{650 \pm 98}$ (0–8900)	70,7	304
Ca	мг/л mg/l	$\bar{60 \pm 11}$ (27–140)	$\bar{110 \pm 17}$ (40–400)	$\bar{180 \pm 27}$ (40–320)	$\bar{110 \pm 17}$ (27–390)	39,2	86,4
Mg		$\bar{70 \pm 11}$ (6–1300)	$\bar{46 \pm 7}$ (12–214)	$\bar{110 \pm 17}$ (19–207)	$\bar{60 \pm 9}$ (6–1300)	18,2	46,2
Na		$\bar{72 \pm 11}$ (6–214)	$\bar{300 \pm 45}$ (100–2500)	$\bar{490 \pm 74}$ (97–811)	$\bar{266 \pm 40}$ (6–2500)	67,6	260
K		$\bar{6,2 \pm 1}$ (0,6–37)	$\bar{3,6 \pm 1}$ (0,7–19)	$\bar{19 \pm 3}$ (2,1–136)	$\bar{6,6 \pm 1}$ (0,6–136)	5,15	18,4

M – общая минерализация, * – сумма макрокомпонентов воды.

M – total dissolved solids, * – total content of water macrocomponents.

вод составляет 7,7. Значения Eh воды слабо изменяется и колеблется в пределах от -0,9 до +11 мВ. Среднее значение Eh для подавляющего числа объектов водопользования составляет -0,2 мВ. Из табл. 1 видно, что средние показатели pH и Eh слабо изменяются в зависимости от химического типа воды. В среднем по установленным уровням pH и Eh воды изученных объектов водопользования можно отнести к слабощелочным с умеренными окислительно-восстановительными условиями.

Особенности пространственного распределения объектов водопользования по типу вод представлены на рис. 2.

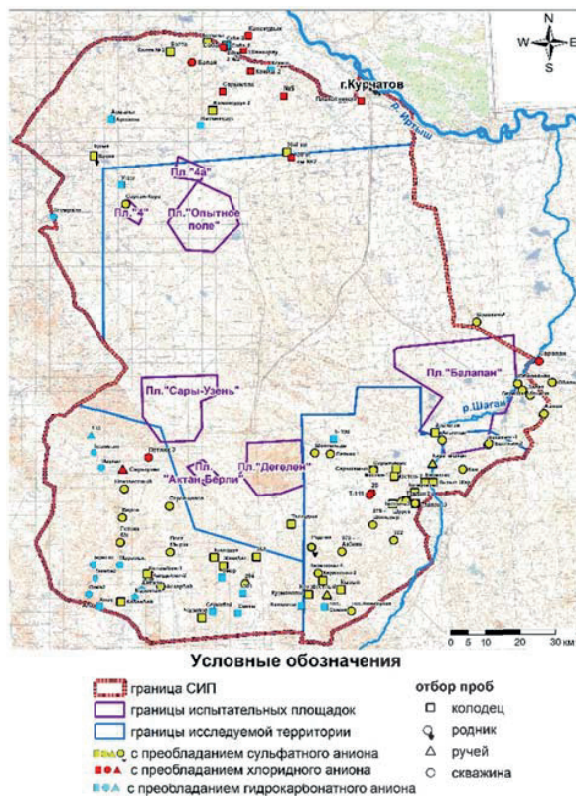


Рис. 2. Пространственное распределение объектов водопользования по химическому типу вод

Fig. 2. Spatial distribution of objects of water use by chemical type of water

При сравнительном анализе макрокомпонентного состава воды (табл. 1) со средним составом подземных вод зоны гипергенеза и континентального засоления было выявлено, что гидрокарбонатные воды имеют схожий состав с подземными водами зоны гипергенеза. Исследуемые сульфатные и хлоридные воды сходны по макрокомпонентному составу с водами зоны континентального засоления.

Из рис. 2 видно, что сульфатные воды, как преобладающие на СИП, распределены по всей его территории. Гидрокарбонатные и хлоридные воды имеются в каждом выделенном участке, но стоит отметить, что слабоминерализованные гидрокарбонатные воды (16 водоисточников) в большин-

стве своем встречаются в Юго-Западной части СИП. Преобладающая часть объектов водопользования с хлоридным типом вод расположена в Северо-Западной части СИП.

Элементный состав воды объектов водопользования

Данные по элементному составу воды объектов водопользования представлены в табл. 2.

Для выявления особенностей элементного состава подземных вод СИП построены убывающие ряды превышений средних концентраций элементов в воде:

- $U_{15} > Mo_{13} > Sr_{10}$ (по отношению к подземным водам зоны гипергенеза);
- $Mo_3 > U_5 > Sr_3$ (по отношению к подземным водам зоны континентального засоления).

Из убывающих рядов видно, что для подземных вод СИП выявлены специфичные элементы, такие как U, Mo, Sr. Вероятно, одной из причин относительно высоких концентраций данных элементов в воде является засушливый климат исследуемой территории. Согласно работам [9–13, 14, 15] в подземных водах регионов с аридным климатом, по сравнению с гумидным, зафиксированы в повышенных концентрациях такие элементы, как U, Mo, Sr, V, As, Ba, Cr, Cu, Li, Ni и Zn. Аналогичная картина выявлена и для подземных вод СИП, в частности для таких элементов, как U, Mo и Sr. Особенности распределения данных элементов в воде объектов водопользования рассмотрены ниже.

Уран. В изученных водах концентрация данного элемента варьирует в зависимости от химического типа вод. Так, в гидрокарбонатных водах среднее содержание урана составляет 8 мкг/л, в сульфатных и хлоридных – 23 мкг/л.

Максимальная концентрации урана обнаружена в сульфатных водах – 120 мкг/л, что в 27 раз превышает среднее содержание в подземных водах зоны континентального засоления. На рис. 3 показана карта пространственного распределения урана в воде объектов водопользования.

Как видно из гистограммы (рис. 3, б), в водах 51 % всех исследуемых объектов водопользования СИП выявлены повышенные содержания урана от 1 до 8 ПДК (ПДК_в=15 мкг/л) [16]. В Юго-Восточной СИП расположено максимальное количество водопунктов (32 объекта) с концентрацией урана в воде выше ПДК (рис. 3, а).

Молибден. Содержание Mo также изменяется относительно химического типа вод. Средняя концентрация молибдена для гидрокарбонатных вод составляет 9,6 мкг/л, сульфатных – 28 мкг/л, хлоридных – 16 мкг/л. В сульфатных водах обнаружена максимальная концентрация молибдена – 240 мкг/л, что в 58 раз выше среднего содержания для вод континентального засоления. Особенности пространственного распределения молибдена в воде объектов водопользования представлены на рис. 4.

Таблица 2. Элементный состав воды объектов водопользования СИП, мкг/л

Table 2. Ultimate composition of water of the STS objects of water use, µg/l

Элемент Element	Тип воды/Type of water			Среднее содержание в подземных водах Mean concentration in underground water		
	Гидрокарбонатные Hydrocarbonate, n=26 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Сульфатные Sulphate, n=58 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Хлоридные Chloride, n=15 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Среднее для СИП Average for the STS $\bar{X} \pm S$ (min-max)	зона гипергенеза hypergenesis zone [9]	зона континентального засоления continental salification zone [9]
Li	17 ± 3 (4-40)	25 ± 4 (4-144)	30 ± 5 (13-46)	24 ± 4 (4-144)	13	39,7
Be	$0,08 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$ (0,10-0,14)	<0,01	$0,10 \pm 0,01$ (0,08-0,14)	0,33	0,19
Al	115 ± 17 (5-200)	120 ± 18 (20-280)	70 ± 10 (16-130)	120 ± 18 (5-280)	226	370
V	3 ± 1 (0,4-9)	5 ± 1 (0,3-24)	8 ± 1 (0,4-23,5)	5 ± 1 (0,3-24)	1,34	2,65
Cr	5 ± 1 (1,9-17,3)	6 ± 1 (1,9-14)	7 ± 1 (2,7-16)	6 ± 1 (1,9-17)	3,03	4,03
Mn	42 ± 6 (6-360)	54 ± 80 (2-560)	300 ± 45 (11-2200)	86 ± 13 (2-2200)	54,5	135
Fe	500 ± 75 (12-6200)	250 ± 38 (19-990)	1600 ± 240 (26-21000)	520 ± 78 (12-21000)	481	710
Co	$0,30 \pm 0,05$ (0,04-0,9)	$0,40 \pm 0,06$ (0,03-1,4)	$1,9 \pm 0,3$ (0,3-13)	$0,6 \pm 0,1$ (0,03-13)	0,39	0,62
Ni	$8,8 \pm 1,3$ (1,2-50)	$8,7 \pm 1,3$ (1-28)	13 ± 2 (1-60)	10 ± 2 (1-60)	3,58	5,47
Cu	$3,0 \pm 0,5$ (0,8-17)	6 ± 1 (1,7-47)	7 ± 1 (4,4-9)	6 ± 1 (0,8-47)	5,58	11,9
Zn	44 ± 7 (4-280)	98 ± 15 (5-1900)	38 ± 6 (15-126)	75 ± 11 (4-1900)	41,4	85,6
As	$3,0 \pm 0,5$ (0,3-20)	$1,4 \pm 0,2$ (0,3-7)	$4,2 \pm 0,6$ (0,5-10)	$2,2 \pm 0,3$ (0,3-20)	1,46	1,93
Sr	730 ± 110 (90-1600)	1800 ± 270 (130-8000)	3400 ± 510 (900-6900)	1800 ± 270 (90-8000)	183	560
Mo	$9,6 \pm 1,4$ (3-24)	28 ± 4 (3-240)	16 ± 2 (3-76)	22 ± 3 (3-240)	1,75	4,12
Cd	$0,10 \pm 0,02$ (0,03-0,2)	$0,10 \pm 0,02$ (0,02-0,6)	$0,20 \pm 0,02$ (0,02-0,3)	$0,10 \pm 0,02$ (0,02-0,6)	0,24	0,42
Cs	$0,030 \pm 0,005$ (0,004-0,1)	$0,030 \pm 0,005$ (0,004-0,1)	$0,020 \pm 0,005$ (0,004-0,1)	$0,030 \pm 0,005$ (0,004-0,1)	0,26	0,6
Ba	18 ± 3 (4-50)	28 ± 4 (5-111)	50 ± 8 (15-100)	27 ± 4 (4-110)	18,3	33,6
La	$0,10 \pm 0,02$ (0,03-0,6)	$0,20 \pm 0,03$ (0,02-3,2)	$0,30 \pm 0,05$ (0,02-0,6)	$0,2 \pm 0,02$ (0,02-3,2)	0,67	-
Ce	$0,7 \pm 0,1$ (0,1-1,2)	$0,6 \pm 0,1$ (0,1-3,4)	$0,9 \pm 0,1$ (0,1-1,4)	$0,7 \pm 0,1$ (0,1-3,4)	-	-
Pr	$0,02 \pm 0,003$ (0,02-0,12)	$0,03 \pm 0,003$ (0,02-0,17)	$0,17 \pm 0,1$ (0,15-0,2)	$0,06 \pm 0,01$ (0,02-0,20)	-	-
Nd	<0,01	$0,05 \pm 0,004$ (0,02-0,9)	$0,52 \pm 0,1$ (0,48-0,56)	$0,40 \pm 0,05$ (0,01-0,9)	-	-
Sm	$0,01 \pm 0,002$ (0,02-0,12)	$0,03 \pm 0,003$ (0,02-0,19)	$0,1 \pm 0,1$ (0,02-0,15)	$0,07 \pm 0,01$ (0,02-0,2)	-	-
Eu	$0,01 \pm 0,002$ (0,02-0,13)	$0,02 \pm 0,003$ (0,02-0,24)	<0,01	$0,05 \pm 0,01$ (0,02-0,24)	-	-
Th	$0,10 \pm 0,02$ (0,01-1,3)	$0,10 \pm 0,02$ (0,01-0,9)	$0,10 \pm 0,02$ (0,01-0,1)	$0,10 \pm 0,02$ (0,01-1,3)	0,24	0,8
U	7 ± 1 (0,4-30)	23 ± 4 (3-120)	23 ± 4 (0,4-61)	20 ± 3 (0,4-120)	1,31	4,32
Pb	$1,1 \pm 0,2$ (0,3-4)	$1,3 \pm 0,2$ (0,3-6)	$2,9 \pm 0,4$ (0,4-19)	$1,5 \pm 0,2$ (0,3-19)	2,97	6,12

Примечание: «-» нет данных.

Note: «-» not available.

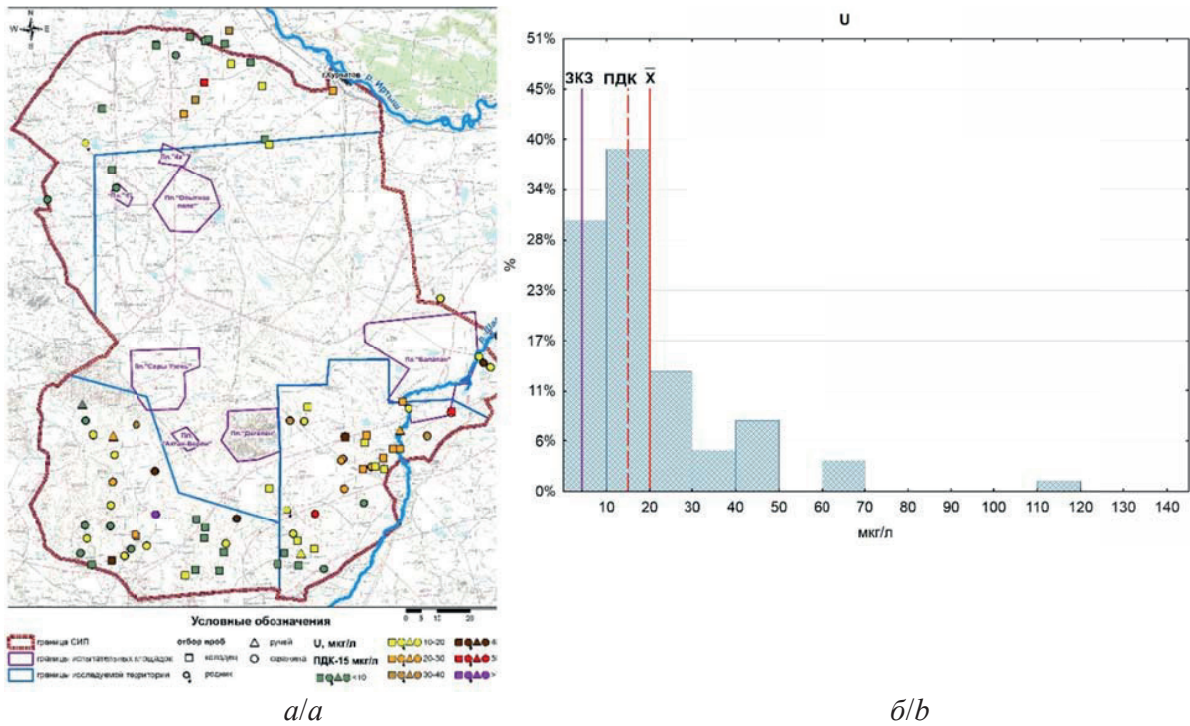


Рис. 3. Пространственное распределение (а) и гистограмма распределения концентрации урана в водах объектов водопользования СИП (б): ЗКЗ – среднее содержание в зоне континентального засоления; X – среднее содержание урана в воде

Fig. 3. Spatial distribution (a) and histogram of uranium distribution in waters of the STS objects of water use (b): ЗКЗ is the mean concentration in the continental salification zone; X is the mean uranium concentration in water

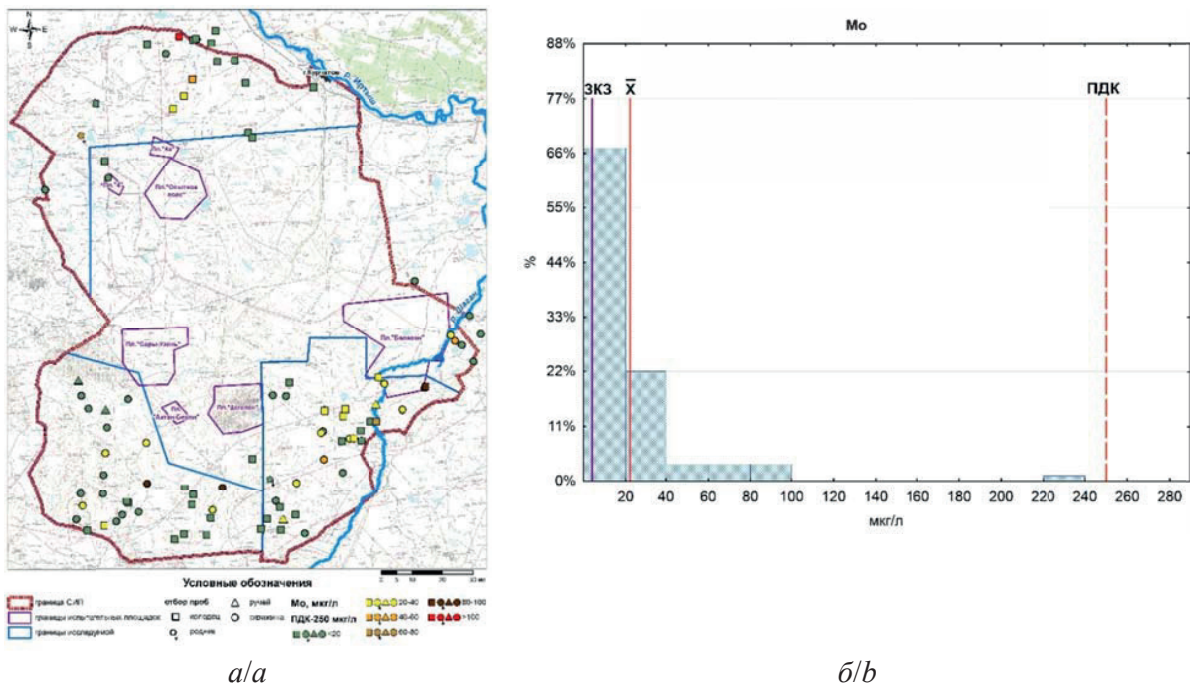


Рис. 4. Пространственное распределение (а) и гистограмма распределения концентрации молибдена в водах объектов водопользования СИП (б): ЗКЗ – среднее содержание в зоне континентального засоления; X – среднее содержание молибдена в воде

Fig. 4. Spatial distribution (a) and histogram of molybdenum concentration distribution in water of the STS objects of water use (b): ЗКЗ is the mean concentration in the continental salification zone; X is the mean molybdenum concentration in water

Из рис. 4 видно, что практически все воды объектов водопользования СИП имеют концентрацию молибдена ниже уровня ПДК (250 мкг/л) [17]. На территории полигона 67 % объектов водопользования, которые расположены в основном в Северо-Западной и Юго-Западной части СИП, содержат молибден в воде на уровне менее 20 мкг/л (рис. 4). Около 30 % вод объектов водопользования полигона имеют концентрацию молибдена в воде от 20 до 100 мкг/л. Следует отметить, что значительная часть колодцев и скважин (19 объектов) с концентрацией молибдена в воде от 20 до 100 мкг/л находится в Юго-Восточной части СИП.

Молибден является элементом, сопутствующим урану, благодаря схожим химическим свойствам [18, 19]. Выявлена положительная корреляционная связь между ураном и молибденом в гидрокарбонатных и сульфатных водах (рис. 5).

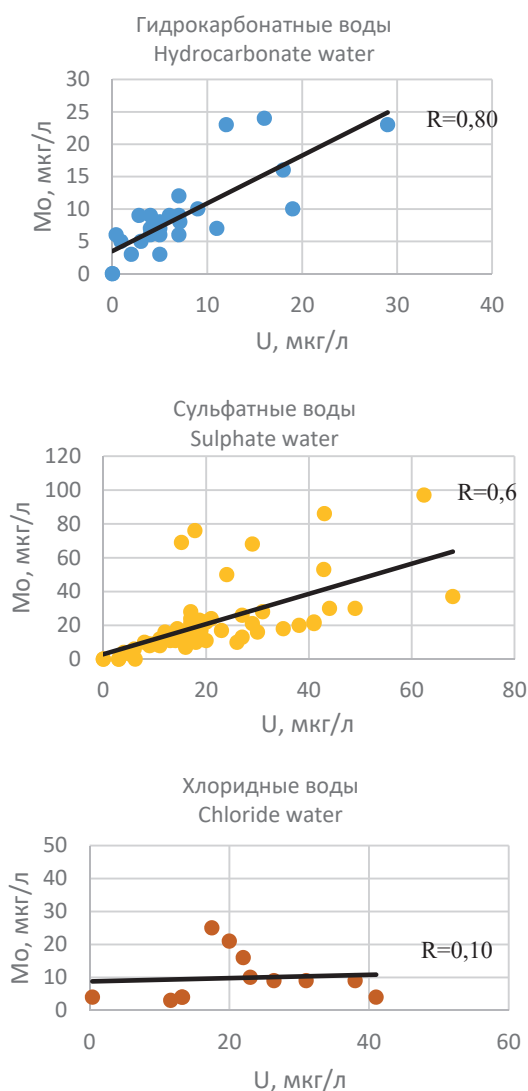


Рис. 5. Корреляционная зависимость урана и молибдена в воде объектов водопользования СИП

Fig. 5. Correlation dependence of uranium and molybdenum in water of the STS objects of water use

Выявлено отсутствие корреляционной связи между ураном и молибденом для хлоридных вод (рис. 5). Предположительно, в различных типах вод СИП на взаимосвязь урана и молибдена влияет содержание гидрокарбонат-иона и уровень общей минерализации. Так, средняя концентрация HCO_3^- составляет 260 мкг/л для всех типов вод, но в минерализованных хлоридных водах его доля среди анионов минимальна.

Стронций. Среднее содержание Sr в гидрокарбонатных водах составляет 730 мкг/л, в сульфатных – 1800 мкг/л, в хлоридных – 3400 мкг/л. Максимальная концентрация обнаружена в сульфатных водах – 8000 мкг/л, что в 14 раз превышает среднюю концентрацию в водах зоны континентального засоления. Превышение уровня ПДК (7000 мкг/л) для воды по стронцию в изучаемых объектах водопользования обнаружено только в одной пробе [19]. Особенности пространственного распределения стронция в объектах водопользования представлено на рисунке (рис. 6).

Общее число объектов водопользования на территории СИП с концентрацией Sr в воде до 1000 мкг/л составляет 42 % (рис. 6). Количество водоисточников с содержанием данного элемента в воде от 1000 до 3000 мкг/л достигает 41 %. В основном эти водоисточники расположены в Юго-Восточной части СИП (23 объекта).

Полученные данные о повышенной средней концентрации Sr в воде объектов водопользования полигона по сравнению с водами континентального засоления были ожидаемы для исследуемой территории. В связи с тем, что территория Казахстана (включая СИП) относится к гидрогеохимической провинции, где общая минерализация грунтовых вод может достигать несколько граммов на литр, содержание стронция может увеличиваться до 10000 мкг/л [19, 20].

Заключение

Вода в объектах водопользования на территории СИП имеет разнообразный химический состав, на всех изученных участках встречаются воды как гидрокарбонатного, так сульфатного и хлоридного типов. Большинство водоисточников имеют слабощелочные воды сульфатного типа.

Результаты проведенных исследований показали, что воды объектов водопользования полигона характеризуются неоднородным микроэлементным составом. Выявлены повышенные содержания U, Mo и Sr в воде объектов водопользования относительно средней концентрации этих элементов в подземных водах зоны гипергенеза и континентального засоления. При этом для Юго-Восточной части СИП установлено наибольшее число колодцев и скважин с относительно высокими концентрациями данных элементов в воде.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (5032/ГФ4 «Выявление механизмов формирования уровня загрязнения химическими токсикантами объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона»).

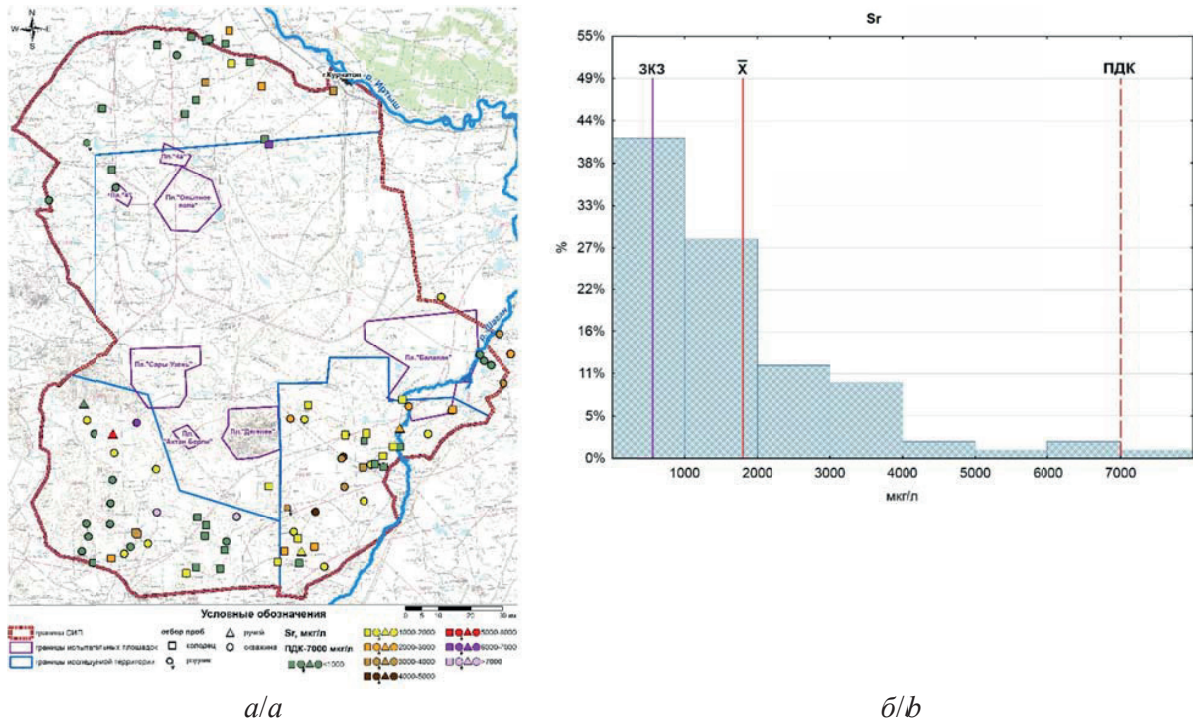


Рис. 6. Пространственное распределение (а) и гистограмма распределения концентрации стронция в водах объектов водопользования СИП (б): ЗКЗ – среднее содержание в зоне континентального засоления; \bar{X} – среднее содержание стронция в воде

Fig. 6. Spatial distribution (a) and histogram of strontium concentration distribution in water of the STS objects of water use (b): ЗКЗ is the mean concentration in the continental salinification zone; \bar{X} is the mean strontium concentration in water

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрильчук Ю.Г., Тоневицкая О.В., Яковенко Ю.Ю. Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 / под рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Т. 2. – Вып. 3. – С. 81–164.
2. Радиоэкологическое состояние «юго-восточной» (район с. Саржал) части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, С.Н. Лукашенко, В.В. Каширский и др. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 г. / под рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 15–117.
3. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона / под рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2010. – Вып. 1. – 234 с.
4. Отчет по РБП 011 «Изучение радиационной обстановки на территории Республики Казахстан. Обеспечение радиационной безопасности: Восточно-Казахстанская область». Т. II. – Алматы: АО «Волковгеология», 2008. – 117 с.
5. ГОСТ Р 51592–2000. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.
6. ГОСТ 26449.1–85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы анализа соленых вод. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 101 с.
7. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E). – Switzerland, 2003. – 30 p. URL: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (дата обращения 26.08.2017).
8. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
9. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
10. Ayotte J., Gronberg J., Apodaca L. Trace elements and radon in groundwater Across the United States, 1992–2003: Scientific Investigation report. – Virginia, Reston, 2011. – 115 p. URL: https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059/pdf/sir2011-5059_report-covers_508.pdf (дата обращения 26.08.2017).
11. Geochemistry and hydrology of perched groundwater springs: assessing elevated uranium concentrations at Pigeon Spring relative to nearby Pigeon Mine, Arizona (USA) // K.R. Beisner, N.V. Parretti, F.D. Tillman et al. / Hydrogeology Journal. – 2017. – V. 25. – № 2. – P. 539–556.
12. Water quality and hydrogeochemistry of a basin and range watershed in a semi-arid region of northern New Mexico / B. Linhoff, P. Longmire, M. Rearick et al. // Environ Earth Sci. – 2016. – V. 75. – P. 640.
13. Alkinani M., Kanoua W., Merkel B. Uranium in groundwater of the Al-Batin Alluvial Fan aquifer, south Iraq // Environ Earth Sci. – 2016. – V. 75. – 869. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5685-3> (дата обращения 26.08.2017).
14. Geochemical characterization of groundwater from an arid region in India / T. Keesari, U.P. Kulkarni, A. Deodhar et al. // Environ Earth Sci. – 2014. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-2878-x> (дата обращения 26.08.2017).
15. Lebid H., Errih M., Boudjemline D. Contribution of strontium to the study of groundwater salinity. Case of the alluvial plain of Sidi Bel Abbes (Northwestern Algeria) // Environ Earth Sci. – 2016. – V. 75. – 947. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5704-4> (дата обращения 26.08.2017).

16. Guidelines for Drinking-water Quality. Vol. 1. 2nd ed. – Geneva: World Health Organization, 2004. – 540 p. URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf (дата обращения 26.08.2017).
17. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения: СанПиН 3.02.002.04. Утверждены приказом и.о. Министра здравоохранения Республики Казахстан от 28 июня 2004 года № 506. – Астана: Адлет, 2004. – 160 с.
18. Основные черты геохимии урана / под ред. академика А.П. Виноградова. 2-е издание, стереотипное и исправленное. – Томск: СТТ, 2013. – 374 с.
19. Крайнов С.Р., Рыженко В.М., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
20. Байганов Ж.К. Отчет о НИР (аналитический): «Эколого-геоботаническая характеристика территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона». – Семипалатинск, 1998. – 37 с.

Поступила 28.08.2017 г.

Информация об авторах

Есильканов Г.М., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лукашенко С.Н., доктор биологических наук, директор Института радиационной безопасности и экологии.

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Койгельдинова М.Т., кандидат биологических наук, начальник лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии.

Мухамедияров Н.Ж., инженер Института радиационной безопасности и экологии.

Шакенов Е.З., инженер Института радиационной безопасности и экологии.

Темиржанова А.Е., инженер Института радиационной безопасности и экологии.

Яковенко Ю.Ю., начальник лаборатории геоинформационных технологий Института радиационной безопасности и экологии.

UDC 577.4:546.212:504.4.054

PECULIARITIES OF WATER ELEMENTAL COMPOSITION AT WATER USE OBJECTS LOCATED AT THE TERRITORY OF THE FORMER SEMIPALATINSK TEST SITE

Gani M. Yessilkanov¹,
gme1@tpu.ru

Sergey N. Lukashenko²,
lukashenko@nnc.kz

Leonid P. Rikhvanov¹,
rikhvanov@tpu.ru

Madina T. Koygeldinova²,
koigeldinova@nnc.kz

Nurlan Zh. Mukhamediyarov²,
mukhamediyarov@nnc.kz

Erbol Z. Shakenov²,
shakenov@nnc.kz

Aray E. Temirzhanova²,
temirzhanova@nnc.kz

Yuliya Yu. Yakovenko²,
yakovenko@nnc.kz

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Institute of Radiation Safety and Ecology,
2, Krasnoarmeyskaya Avenue, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

Relevance of the work is determined by the necessity of obtaining reliable data on concentrations of chemical elements in water of the former Semipalatinsk test site water objects. This information is needed to reveal potentially-hazardous objects, those can affect the health of people inhabiting this territory.

The aim of the work is to study the peculiarities of water ultimate composition in the water objects used by the people living at the territory of the former Semipalatinsk test site.

The methods. Water ultimate composition was determined by inductively coupled plasma mass-spectrometry (Elan 9000 «Perkin Elmer SCIEX»), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry («iCAP 6300 Duo» Thermo Scientific). To analyze such characteristics as total salt content, content of sulphates, hydrocarbonates, chlorides, calcium, magnesium and sodium, the titrimetric, colorimetric, and potentiometric methods of measurement were used.

Results. Chemical composition of water of the former Semipalatinsk test site water object is not uniform. 26 % of all the samples studied have hydrocarbonate-sodium-magnesium composition, 58 % – sulphate-sodium- magnesium, sulphate-sodium-magnesium and sulphate-sodium-calcium composition, 15 % – chloride-sodium-magnesium composition. Comparing the macrocomponent composition of water with an average composition of ground water of hypergenesis zone and continental salification zone, it was found that hydrocarbonate water is similar in composition with hypergenesis water. The studied sulphate and chloride water types are similar in macrocomponent composition with water of continental salification zone. To find the peculiarities in the former Semipalatinsk test site water ultimate composition, the authors have built the descending series of exceedence of concentrations related to the mean composition of hypergenesis zone water and continental salification zone water: $U_{15} > Mo_{13} > Sr_{10}$ (hypergenesis zone), $Mo_5 > U_5 > Sr_3$ (continental salification zone). The decreasing series show that in the former Semipalatinsk test site ground water such elements as U, Mo, Sr can be typically found. In water of 51 % of all the researched water objects of the former Semipalatinsk test site, the increased concentrations of U from 1 to 8 MPC ($MPC_U = 15 \mu\text{g/l}$) were found. According to results of isotopic analysis, uranium in water can be of natural origin. Excessive concentrations of Sr in ground water can be explained by the presence of strontium hydrogeochemical area at the territory of Kazakhstan. Therefore, the discovered increased concentrations of molybdenum, uranium and strontium in water of the former Semipalatinsk test site water objects are associated with the natural and climatic peculiarities of the region.

Key words:

Semipalatinsk test site, water, ground water, objects of water use, heavy metals, chemical composition.

The research was partially supported by the grant financing of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (5032/GF4 «Determining the mechanisms of formation of pollution degree of the objects of water use at the former Semipalatinsk test site with chemical toxic agents»).

REFERENCES

1. Strilchuk Yu.G., Tonevitskaya O.V., Yakovenko Yu.Yu. Radiological situation in the «Western» part of the STS territory. *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Proc. of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for the 2010*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2011. Vol. 2, Iss. 3, pp. 81–164. In Rus.
2. Strilchuk Yu.G., Lukashenko S.N., Kashirskiy V.V. Radioecological state of the «Southeastern» part of the STS (in vicinity of Sarzhal village). *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Proc. of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for the 2011–2012*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2013. Vol. 1, Iss. 4, pp. 15–117. In Rus.
3. *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Radioecological state of the «northern» part of Semipalatinsk Test Site*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2010. Iss. 1, 234 p. In Rus.
4. *Otchet o RBP 011 «Izucheniye radiatsionnoy obstanovki na territorii Respubliki Kazakhstan. Obespecheniye radiatsionnoy bezopasnosti. Vostochno-Kazakhstanskaya oblast»*. [Report on RBP 011 «Study of radiation situation at the territory of the Republic of Kazakhstan. Provision of radiation safety. East-Kazakhstan District»]. V. II. Almaty, Volkovgeologiya Publ., 2008. 177 p.
5. *GOST R 51592–2000. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [State Standard R 51592–2000. Water. General requirements for sampling.]. Moscow, Standard publishing house, 2000. 8 p.
6. *GOST 26449.1–85. Ustanovki distillyatsionnye opresnitelnye stacionarnye. Metody analiza solenikh vod* [State Standard 26449.1–85. Stationary distillatory desalination units. Methods for analysis of salt waters]. Moscow, Standard publishing house, 2003. 101 p.
7. *Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) Part 2: Determination of 62 elements – ISO 17294-2:2003 (E)*. Switzerland, 2003. – 30 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (accessed 26 August 2017).
8. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
9. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
10. Ayotte J., Gronberg J., Apodaca L. *Trace elements and radon in groundwater across the United States, 1992–2003*: Scientific Investigation report. Virginia, Reston, 2011. 115 p. Available at: https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059/pdf/sir2011-5059_report-covers_508.pdf (accessed 26 August 2017).
11. Beisner K.R., Paretto N.V., Tillman F.D. Geochemistry and hydrology of perched groundwater springs: assessing elevated uranium concentrations at Pigeon Spring relative to nearby Pigeon Mine, Arizona (USA). *Hydrogeology Journal*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 539–556.
12. Linhoff B., Longmire P., Rearick M. Water quality and hydrogeochemistry of a basin and range watershed in a semi-arid region of northern New Mexico. *Environ Earth Sci.*, 2016, vol. 75, pp. 640.
13. Alkinani M., Kanoua W., Merkel B. Uranium in groundwater of the Al-Batin Alluvial Fan aquifer, south Iraq. *Environ Earth Sci.*, 2016, vol. 75, 869. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5685-3> (accessed 26 August 2017).
14. Keesari T., Kulkarni U.P., Deodhar A. Geochemical characterization of groundwater from an arid region in India. *Environ Earth Sci.*, 2014. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-2878-x> (accessed 26 August 2017).
15. Lebid H., Errih M., Boudjemline D. Contribution of strontium to the study of groundwater salinity. Case of the alluvial plain of Sidi Bel Abbes (Northwestern Algeria). *Environ Earth Sci.*, 2016, vol. 75, 947. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5704-4> (accessed 26 August 2017).
16. *Guidelines for Drinking-water Quality*. Vol. 1. 2nd ed. Geneva: World Health Organization, 2004. 540 p. Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf (accessed 26 August 2017).
17. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k kachestvu vody tseentralizovannykh sistem pityevogo vodosnabzheniya. SanPiN 3.02.002.04 Uverzhdeny prikazom i.o. Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 28 iyunya 2004 goda № 506* [Sanitary-epidemiological requirements for quality of water of centralized potable water supply systems. Sanitary regulations and standards 3.02.002.04. Approved by the order of Acting Minister of Healthcare of the Republic of Kazakhstan of the 28th of June, 2004 no. 506]. Astana, Adlet Publ., 2004. 160 p.
18. *Osnovnye cherty geokhimii urana* [Main features of uranium geochemistry]. Ed. by academician A.P. Vinogradov. 2nd edition, stereotyped and corrected. Tomsk, STT Publ., 2013. 374 p.
19. Kraynov S.R., Ryzhenko V.M., Shvetz V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground water. Theoretical, applied and ecological aspects]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
20. Bayganov Zh.K. *Ekologo-geobotanicheskaya kharakteristika teorii byushego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona: otchet o NIR (analitichesky)* [Research report (analytical): Ecological and geobotanic characteristics of the former Semipalatinsk Test Site territory]. Semipalatinsk, 1998. 37 p.

Received: 28 August 2017.

Information about the authors

Gani M. Yessilkanov, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Lukashenko, Dr. Sc., director, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Madina T. Koygeldinova, Cand. Sc., head of the laboratory, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Nurlan Zh. Mukhamediyarov, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Erbol Z. Shakenov, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Aray E. Temirzhanova, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

Yuliya Yu. Yakovenko, head of the laboratory, Institute of Radiation Safety and Ecology.