

УДК 539.163:574.64:621.039

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРО- И МАКРОКОМПОНЕНТОВ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДОЕМЕ “АТОМНОЕ ОЗЕРО”

© 2019 г. М. Р. Актаев^{1,*}, С. Н. Лукашенко¹, А. О. Айдарханов¹, О. Н. Ляхова¹,
Т. Ш. Токтаганов¹, И. В. Токарев²

¹ Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² Санкт-Петербургский государственный университет, Научный парк, Ресурсный центр “Геомодель”,
Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: Aktaev@nnc.kz

Поступила в редакцию 29.07.2017 г.

Представлены результаты исследования современного состояния водоема “Атомное озеро”, сформированного при проведении термоядерного взрыва в 1965 г. на территории Семипалатинского испытательного полигона. В работе рассмотрены распределения химических компонентов и искусственных радионуклидов в водной толще озера. Проанализированы основные механизмы формирования распределения и факторы, их определяющие. Обнаружено, что микро-макро-компоненты и техногенные радионуклиды ⁹⁰Sr и ³H имеют специфическое пространственное распределение. Во всех случаях минимальные значения наблюдаются на поверхности (до 10 м) озера, максимальные – на дне (60–80 м). Установлено, что водоем “Атомное озеро” имеет устойчивый характер распределения исследуемых компонентов по глубине, начиная с 20 м. Вероятными источниками происхождения радионуклидного загрязнения являются грунты и донные отложения озера, а основным механизмом, определяющим распределение радионуклидов, является стратификация водной толщи в силу разной минерализации водных слоев.

Ключевые слова: водоем “Атомное озеро”, радионуклид тритий (³H), стронций (⁹⁰Sr), стабильные изотопы (²H/¹⁸O), микро-макро-компоненты, распределение по глубине

DOI: 10.1134/S0869803119030044

Водоем “Атомное озеро” образовался в результате первого советского опытно-промышленного подземного ядерного взрыва с выбросом грунта (экскавационный). Взрыв был произведен в январе 1965 г. с целью получения информации о возможности использования таких взрывов для образования глубоких воронок, показав тем самым полезность, а возможно, и необходимость применения ядерных зарядов для создания водохранилищ в засушливых районах страны. Данное испытание было проведено в месте слияния двух небольших рек: р. Шаган и р. Ащису (площадка “Балапан” – южная часть Семипалатинского испытательного полигона). Взрыв был проведен на глубине 178 м. Мощность термоядерного взрыва составила 140 кт [1].

В результате выброса грунта при взрыве образовалась воронка диаметром 400 м и глубиной около 100 м. После заполнения воронки весенними паводковыми водами образовался водоем, являющийся самым крупным водоемом на территории полигона (более 6 млн м³). Водоем создавался

для хозяйственных нужд, в том числе для регулирования стока р. Шаган.

Основное количество радионуклидов на “Атомное озеро” сосредоточено в грунтах навала, образованного в результате выброса. Удельная активность техногенных радионуклидов в грунте навала составляет 4000 Бк/кг по ²⁴¹Am, 15000 Бк/кг по ¹³⁷Cs, 17000 Бк/кг по ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, 10000 Бк/кг по ⁹⁰Sr, 65000 Бк/кг по ³H, 20000 Бк/кг по ¹⁵²Eu и 13000 Бк/кг по ¹⁵⁴Eu [2, 3].

В воде озера такие радионуклиды, как ¹³⁷Cs и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, практически не обнаруживаются, их концентрации – <0.03 и <0.002 Бк/кг соответственно. Концентрации ³H лежат в диапазоне от 100 до 1500 Бк/кг, ⁹⁰Sr – от 1 до 3 Бк/кг, при этом значения удельных активностей ³H и ⁹⁰Sr изменялись в зависимости от места отбора воды [4, 5]. Вероятнее всего, это связано с вымыванием радионуклидов из различных участков прибрежных грунтов и их последующим перемешиванием в воде [6].

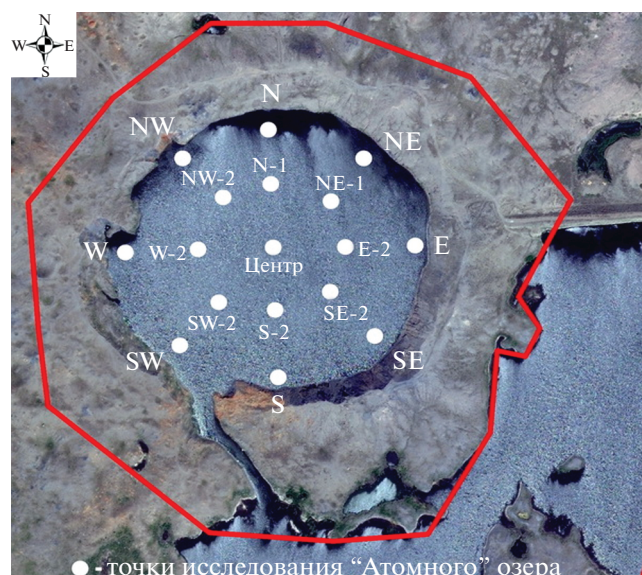


Рис. 1. Расположение точек отбора проб воды.

В качестве возможного механизма загрязнения водоема «Атомное озеро» также предполагается наличие зон питания, по которым происходит поступление загрязненных подземных вод из полостей рядом расположенных «боевых» скважин. Данное предположение основано на результатах комплексных работ, проведенных в рамках исследования путей миграции техногенных радионуклидов из полостей подземных ядерных испытаний площадки «Балапан» [7].

Таким образом, современное радионуклидное загрязнение водоема «Атомное озеро» может быть обусловлено рядом факторов:

- вымывание радионуклидов из грунтов навала атмосферными выпадениями;
- вымывание радионуклидов из донных отложений и береговых грунтов;
- поступление радионуклидов с подземными водами;
- перемешивание водных масс за счет ветра и тепловой конвекции.

А механизмом формирования распределений исследуемых компонентов могут быть процессы, связанные с перемешиванием водных масс за счет ветра, тепловой конвекции и поступления подземных вод.

Целью данной работы было получение более детальных химико-радиационных и гидрологических характеристик водоема «Атомное озеро», а также выявление наиболее значимых факторов, определяющих характер распределения микро- и макрокомпонентов и искусственных радионуклидов в водной толще «Атомное озеро».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Общая методология исследования заключалась в измерении температурного режима водоема, отборе проб воды в различных частях озера и их лабораторном анализе. Все работы по отбору проб воды и измерению температуры проводились в летний, осенний и весенний периоды (июль, сентябрь, ноябрь, март).

Выбор точек исследования

Точки обследования были распределены по радиальным линиям, пересекающимся в центре водоема, привязанным к сторонам света: северному, северо-восточному, восточному, юго-восточному, южному, юго-западному, западному и северо-западному (рис. 1).

Всего было выбрано 17 точек исследования, на каждой из которых проводились послойный отбор воды и измерение температуры. На прибрежных участках точки отбора были расположены на расстоянии 30 м от уреза воды. В зависимости от глубины водоема в пункте опробования вертикальный интервал между точками отбора составлял 5–10 м.

Отбор воды для радионуклидного, химического и изотопного анализа

В летний период работы по отбору проб воды проводились с помощью лодки. В зимний период отбор проб проводили с поверхности ледяного покрова. Координаты точек измерений и отбора проб определяли с помощью спутниковой системы навигации. Отбор и консервацию проб проводили стандартным методом согласно [8].

Для отбора воды с поверхности использовали полиэтиленовые емкости. Отбор послойных проб производили с помощью пробоотборника Симоннова. Пробоотборник состоит из нижнего и верхнего конусообразных клапанов, цилиндрической трубы, маркированного троса (лота) и барабанной катушки. Длина трубы 60 см, диаметр 50 мм, что позволяет отбирать пробу объемом 1 л. Перед отбором в каждой точке на заданную глубину погружали нижний клапан пробоотборника, закрепленный на тросе и являющийся отвесом. Затем по тросу свободно опускали цилиндрическую трубу, герметично фиксирующуюся на клапане. После чего спускали верхний клапан и производили подъем пробоотборника на поверхность. При необходимости получения большого объема воды операция повторялась. Объем пробы рассчитывали, исходя из количества воды, необходимого для проведения химического (микро- и макрокомпоненты), изотопного ($^2\text{H}/^{18}\text{O}$) и радионуклидного (^3H , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{137}Cs) анализов.

Лабораторный анализ

Лабораторные работы по определению содержания исследуемых компонентов проводились в соответствии с методическими указаниями и инструкциями на поверенной лабораторной аппаратуре.

Определение содержания техногенных радионуклидов выполняли в соответствии со стандартными методиками: ^{137}Cs и ^{241}Am – γ -спектрометрическим методом [9]; определение $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr – альфа- и бета-спектрометрически после радиохимической подготовки согласно [10–12]. Концентрацию ^3H определяли методом жидкоцинтилляционной спектрометрии с использованием β -спектрометра TRI-CARB 2900 TR в соответствии с ISO 9698/1989 [13].

Определение микро- и макрокомпонентного состава воды проводили в соответствии с методиками [14, 15].

Анализ содержания стабильных изотопов дейтерия и кислорода ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) был проведен в лаборатории РЦ “Геомодель” научного парка Санкт-Петербургского государственного университета, на лазерном спектрометре Picarro L-2120i. В качестве внутренних стандартов использовали пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта VSMOW (МАГАТЭ). Точность измерения ^2H и ^{18}O составила $\pm 1\%$ и 0.5% соответственно.

Измерение температуры воды

Термометрию вод проводили по глубине водоема во время летней и зимней стагнации водоема, в одних и тех же точках обследования. Вертикальный интервал измерения от поверхности озера до глубины 10 м составлял 1 м, далее до дна озера измерение проводилось через каждые 5 м. Измерения температуры проводили переносным электротермометром, изготовленным на базе Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Погрешность измерений составляла $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Прямые результаты регистрировали в виде сопротивления (Ом), затем через уравнение зависимости сопротивления от температуры, полученное при градуировке в эталонном объекте (скважине), пересчитывали в температуру.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение искусственных радионуклидов

Распределение ^3H . Анализ распределения ^3H проводили во всех 17 заложенных точках обследования. В связи с тем, что полученные результаты охватывают широкий диапазон значений, для оси по ^3H использована логарифмическая шкала. Ре-

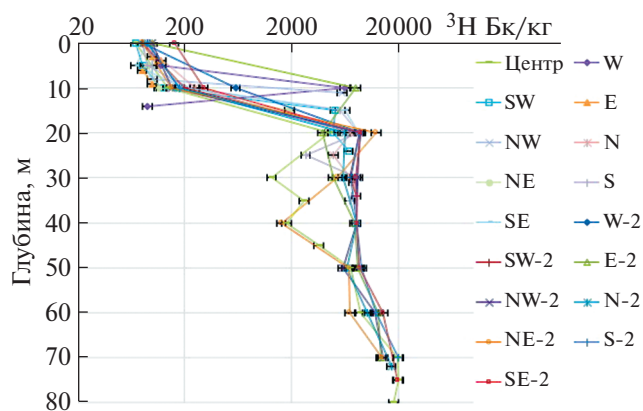


Рис. 2. Распределение ^3H по глубине вод “Атомное озеро” (здесь и далее нижние точки на графиках соответствуют дну озера для данной точки).

зультаты исследования, проведенного 17.09.2013 г., представлены на рис. 2.

Согласно представленным данным, практически на всех профилях, расположенных в различных частях водоема, отмечается нарастание концентрации ^3H с глубиной. Наименьшие содержания ^3H в пределах 80–300 Бк/кг характерны для поверхностного слоя воды до глубины 10 м. На глубине около 20 м повсеместно наблюдается скачок активности ^3H до 3900–12300 Бк/кг. Затем происходит плавное нарастание содержания ^3H , а максимальные значения фиксируются в центре озера на глубине 70–80 м, где его активность достигает 20000 Бк/кг.

Следует отметить тонкие отличия в вертикальном распределении ^3H в различных частях озера. Для профиля “NE-2” на глубине 20 м имеет место резкое повышение концентрации ^3H до 12300 Бк/кг, одновременно для этого же профиля отмечается локальный минимум на глубине 40 м (1600 Бк/кг). Для профилей “E-2”, “W” и “NW” резкий рост концентрации ^3H отмечается уже на глубине 10 м до 5900–7900 Бк/кг. Для профиля в центре озера (“центр”) выраженный минимум концентраций ^3H наблюдается на глубинах 35–45 м (1300–3600 Бк/кг).

Вариации распределения ^3H во времени. Динамику содержания ^3H , которая может быть обусловлена процессами внутреннего перемешивания и внешним водообменом, проверяли в ходе мониторинга центральной точки, на которой проводился пробоотбор. Результаты наблюдений представлены на рис. 3.

Согласно данным суточных наблюдений, значимых изменений в распределении ^3H по глубине не наблюдается, за исключением глубины 20 м, где наблюдается увеличение концентрации ^3H от

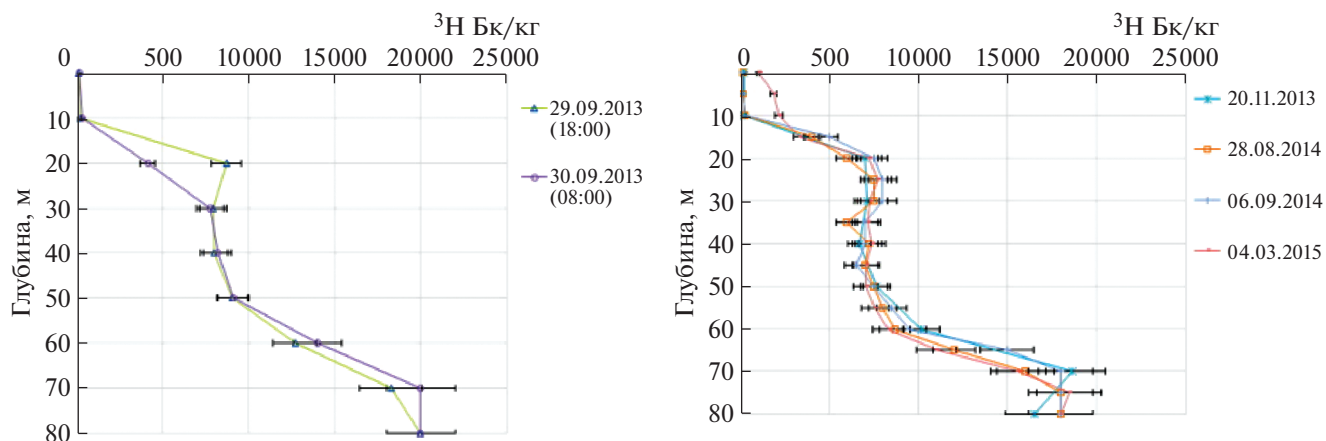


Рис. 3. Изменения содержания ^3H во времени в центре "Атомное озеро".

4000 до 8500 Бк/кг. Другие изменения, наблюдаемые на глубине 60–80 м, находятся в пределах погрешности определения удельной активности ^3H .

Наблюдения показывают некоторые изменения в содержании ^3H на верхнем слое до 10 м, где в весенний период концентрации ^3H увеличивается примерно на 1000 Бк/кг.

Распределение ^{90}Sr . Возможную динамику концентрации ^{90}Sr , как и ^3H исследовали в ходе мониторинга центральной точки озера, где проводился отбор проб. Наблюдения были выполнены в ноябре 2013 г., а также в августе и сентябре 2014 г. Результаты наблюдений представлены на рис. 4.

Распределение концентрации ^{90}Sr за наблюдаемый период без изменений, во всех случаях минимальные значения фиксируются в приповерхностном слое до 10 м, активностью 1.0 Бк/кг, далее в интервале 20–60 м прослеживается зона относительно стабильного распределения в пределах 4.5–7.5 Бк/кг, максимальные concentra-

ции отмечаются на глубине 7–80 м, с концентрацией до 15 Бк/кг.

Распределение $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs . Анализ содержания $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs , как и ^{90}Sr проводился в центральной точке, по всей исследуемой глубине озера.

Содержание $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs во всех точках обследования оказалось ниже минимально-детектируемых активностей используемого аппаратурно-методического обеспечения, которые составили 0.001 Бк/кг для $^{239+240}\text{Pu}$, 3 Бк/кг для ^{241}Am и 0.01 Бк/кг для ^{137}Cs .

Распределение химических элементов

Общехимический анализ воды состоял из определения общей минерализации, катионно-анионного состава, pH и содержания микроэлементов.

Общая минерализация и pH. Анализ общей минерализации и pH проводили в центральной точке озера, по глубине. Результаты распределения минерализации и кислотно-щелочного потенциала по глубине представлены на рис. 5.

Минимальные значения минерализации найдены в приповерхностном слое воды до глубин 10–20 м. В интервале 20–60 м отмечается зона устойчивых значений общей минерализации, а максимальные величины наблюдаются в придонном слое воды. Профиль изменения кислотно-щелочного потенциала по глубине имеет более сложный вид с общим трендом уменьшения pH от поверхности к дну.

Согласно результатам отобранных проб 2013 и 2015 г., заметные изменения минерализации имеют место в приповерхностном слое воды, а pH – во всей толще воды. При этом для кислотно-щелочного потенциала отмечаются резкие аномалии в интервалах глубин 30–40 и 70–80 м (напомним,

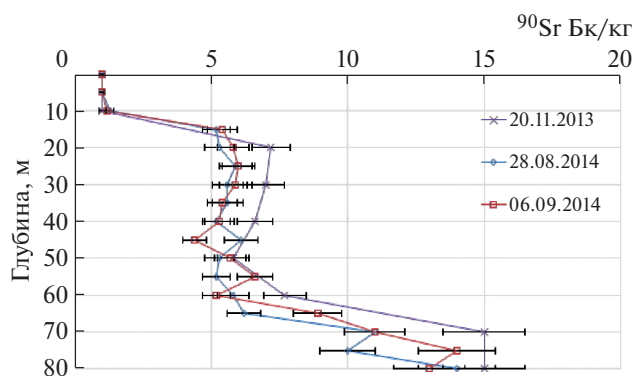


Рис. 4. Изменение содержания ^{90}Sr во времени в центре "Атомное озеро".

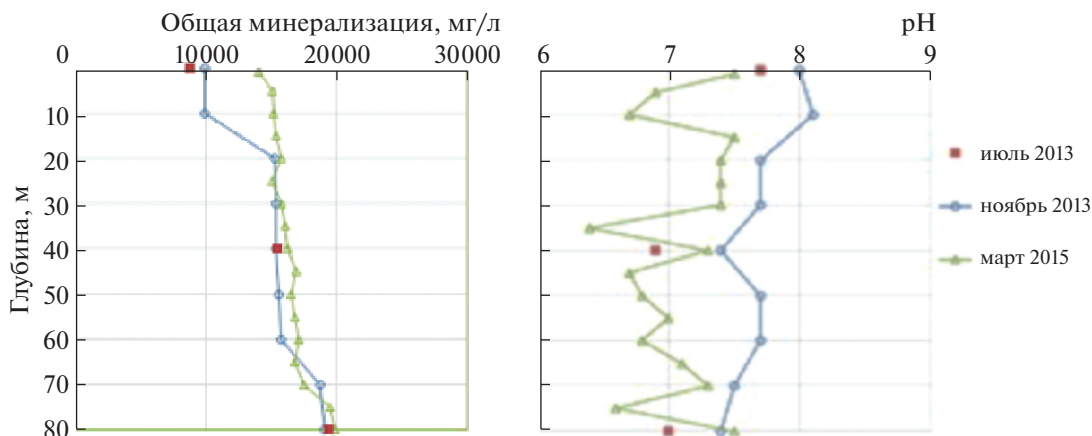


Рис. 5. Распределение общей минерализации (а) и рН (б) в центре “Атомное озеро”.

что изменение рН на одну единицу соответствует изменению концентрации ионов водорода в 10 раз).

Макрокомпоненты. Характер изменения содержания основных макрокомпонентов на 20.11.2013 г. представлен на рис. 6.

Особенности распределения Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- по глубине почти полностью идентичны распределению общей минерализации, поскольку эти компоненты (вместе с натрием) определяют соленость воды. Содержания гидрокарбонатов невелики, варьируют незначительно и лимитируются, по-видимому, концентрациями кальция и магния. Заметное отличие от профиля общей минерализации обнаруживают сульфаты, для которых в придонном слое отмечается устойчивый минимум содержания.

Микроэлементы. Анализ распределения микроэлементов проводили по глубине во всех 17 заложённых точках обследования озера. Всего проанализировано содержание 18 микроэлементов: Mg, Sr, Ba, Cs, Mo, Zn, Be, Al, V, Mn, Fe, Ni, Cu,

Cd, Pb, U, Li, Ti. Обобщённые статистические данные по указанным микроэлементам представлены в табл. 1.

В целом практически все исследованные микроэлементы характеризуются неравномерным распределением по глубине, а распределения Sr, V, Fe, Ni, Cu, Mg сильно коррелируют друг с другом. Для визуализации их распределений проведено нормирование измеренных значений на среднее, полученные результаты представлены на рис. 7.

Таким образом, для микроэлементов характерны профили распределения по глубине, аналогичные радионуклидам и химическим компонентам. Минимальные содержания отмечаются на поверхности озера, максимальные – на дне.

Распределение изотопов

Анализ распределения изотопов кислорода-18 (^{18}O) и дейтерия (2H) проводили по глубине в центральной точке озера. Результаты представлены на рис. 8.

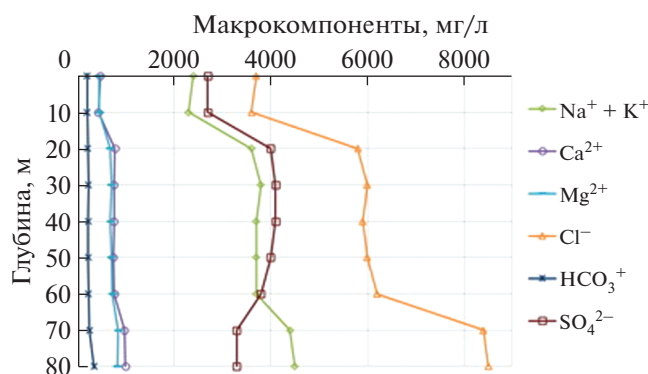


Рис. 6. Распределение основных макрокомпонентов в центре “Атомное озеро”.

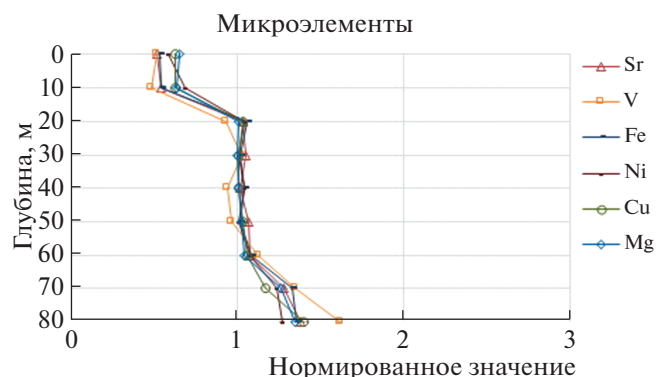


Рис. 7. Распределение некоторых микроэлементов в центре “Атомное озеро”.

Таблица 1. Содержание микроэлементов в водах “Атомного озера”, мкг/л

№	Микроэлемент	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
1.	Al	<п.о.*	9.4	40.8
2.	Ba	19.0	47.4	96.0
3.	Be	<п.о.*	0.04	0.5
4.	Cd	<п.о.*	0.11	0.4
5.	Cs	<п.о.*	0.04	0.2
6.	Cu	21.0	37.9	60.0
7.	Fe	898.0	1755.6	2917.0
8.	Li	67.0	103.9	152.0
9.	Mg	365.0	558.9	800.0
10.	Mn	<п.о.*	1.1	9.4
11.	Mo	0.2	16.5	38.6
12.	Ni	13.0	23.8	38.0
13.	Pb	<п.о.*	0.56	1.9
14.	Sr	8.6	14.9	28.0
15.	Ti	<п.о.*	3.6	10.3
16.	U	2.0	26.8	37.0
17.	V	6.2*	18.0	36.2
18.	Zn	7.9	19.5	41.0

* Погрешность определения $\pm 10\%$, п.о. – предел обнаружения для: Al – 1, Mn – 0.1, Ti – 0.04, Cs – 0.004, Be – 0.01, Cd – 0.01, Pb – 0.01.

Изотопный состав озера характеризуется изменением (облегчением) содержания ^2H и ^{18}O на глубинах 5 и 65–70 м. Изменение отношений стабильных изотопов в верхних частях водоема, вероятно, связано с разбавлением и перемешиванием с атмосферными осадками, которые характеризуются более облегченными изотопными содержаниями. Изменение в интервале 65–70 м говорит о вероятном перемешивании воды на данном горизонте с подземными водами, относительно облегченными изотопами ^2H и ^{18}O .

Для оценки данного предположения проведен сравнительный анализ стабильных изотопов “Атомное озеро” со значениями изотопов близлежащих подземных вод площадки “Балапан”, которые отбирались в рамках РБП “Обеспечение безопасности СИП” в 2015 г. [15].

Для сравнительного анализа были использованы воды, отобранные по всей глубине из “Атомное озеро” в сентябре 2013 г. и августе 2014 г., а также значения стабильных изотопов подземных вод площадки “Балапан”, распространенные на

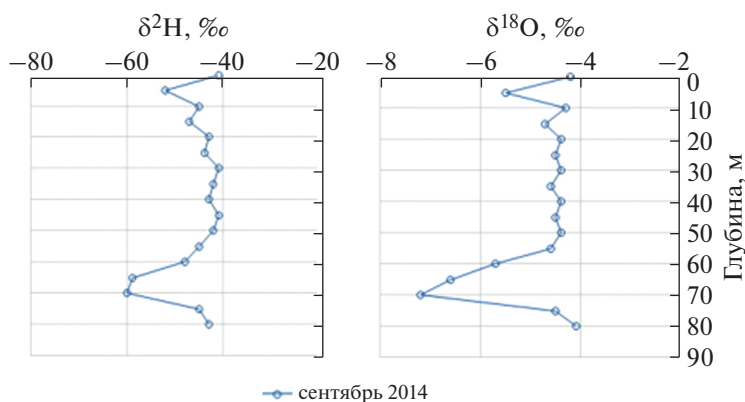


Рис. 8. Распределение изотопов ^{18}O и ^2H в центре “Атомное озеро”.

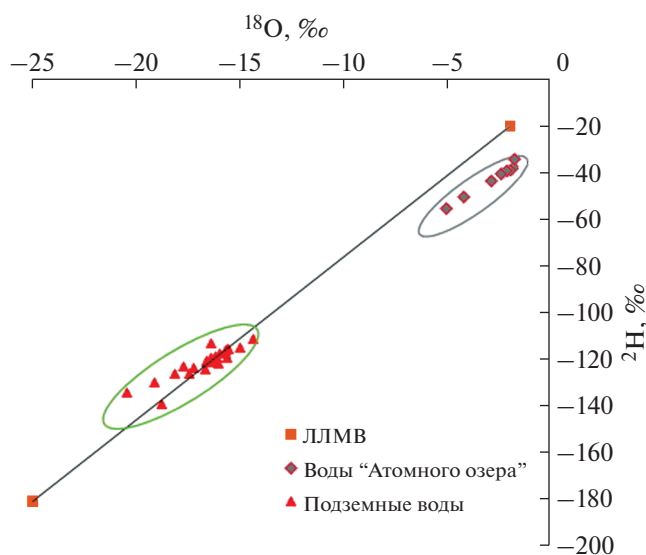


Рис. 9. Сравнительный анализ стабильных изотопов вод “Атомное озеро” и подземных вод площадки “Балапан”.

потенциальных участках поступления загрязненных вод. Результаты представлены на рис. 9.

Согласно анализу, изотопный состав “Атомное озеро” существенно отличается от трещинных вод пл. “Балапан”, что показывает отсутствие их смешения. Все воды “Атомное озеро” обогащены более тяжелыми изотопами по отношению к локальной линии метеорных вод. Данное отклонение оценивалось по величине эксцесса (избытка) дейтерия $d_{ex} = \delta^2H - 7 \times \delta^{18}O$. Согласно вычислениям, значения d_{ex} для всех образцов воды “Атомное озеро” являются отрицательными и изменяются в диапазоне от -2.4 до $-10.6‰$. Это

говорит о том, что фракционирование изотопов водоема в первую очередь связано с процессом испарения, при котором в остаточной воде конденсируются тяжелые изотопы 2H и ^{18}O .

Распределение температуры

Измерение температуры проводили во всех заложенных 17 точках исследования. Результаты распределения температуры воды представлены на рис. 10.

Полученные температурные значения во всех измеренных точках озера показывают отчетливый градиент в вертикальном распределении. В летнее время на глубине до 6 м от поверхности озера наблюдается интервал относительно теплых вод с температурой от 18.3 до $21.8^\circ C$. Далее с 7 до 9 м происходит резкое понижение температуры от 15.2 до $4.2^\circ C$. Начиная с 10 м понижение температуры происходит плавным образом до минимума $1.5^\circ C$, на глубине 40–50 м. Глубже 50 м температура вод плавно повышается и достигает максимума $3.8^\circ C$ на дне озера.

В зимнее время распределение температуры отличается от летнего до глубины 25 м от поверхности. В первых 2 м от зоны ледяного покрова температура вод отпускается до $0.3-0.7^\circ C$, далее до 15 м температура придерживается в пределах стабильного $1.2-1.9^\circ C$, а на 20 м отмечается повышение до $2.2^\circ C$.

Таким образом, зона изменения температуры в течение годового хода (термоклин) находится на глубине до 20 м, ниже следует глубинный холодный слой воды.

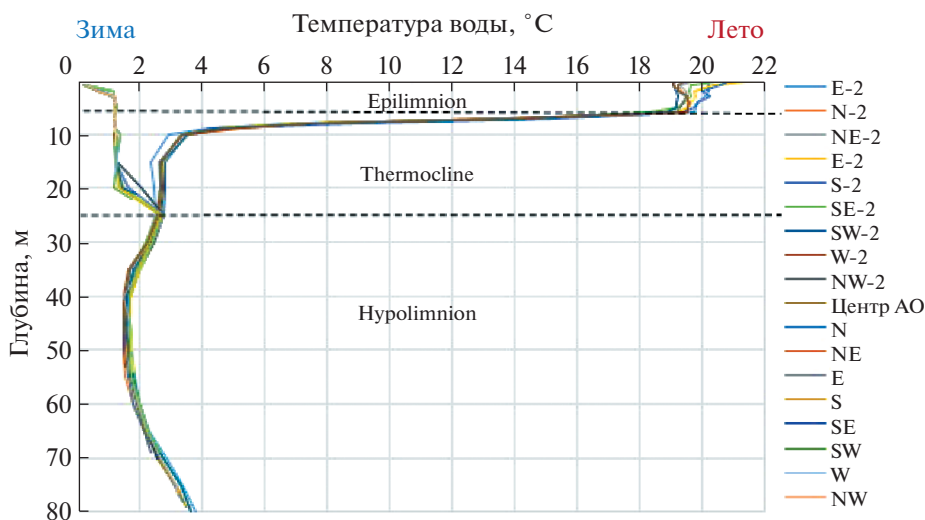


Рис. 10. Распределение температуры вод “Атомное озеро”.

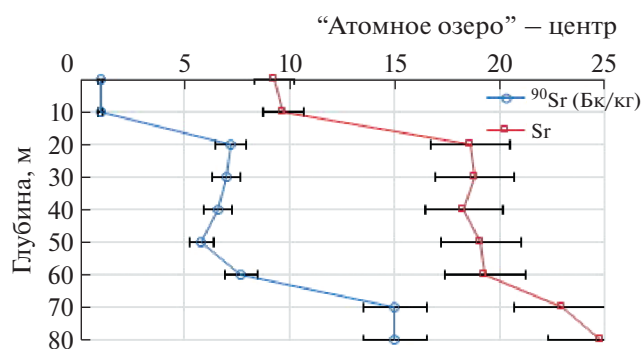


Рис. 11. Сравнительный анализ ^{90}Sr и Sr стабильного вод "Атомное озеро".

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенными исследованиями установлено, что содержание техногенных радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs во всех точках исследования, отобранных как на поверхности, так и со дна озера ниже минимально-детектируемых активностей используемого аппаратурно-методического обеспечения, которые составили 0.001 Бк/кг для $^{239+240}\text{Pu}$, 3 Бк/кг для ^{241}Am и 0.01 Бк/кг для ^{137}Cs . При этом, как было описано выше, основное радионуклидное загрязнение озера сосредоточено в грунтах навала, образованного при экскавационном взрыве, и достигает значимых величин: 4000 Бк/кг по ^{241}Am , 15 000 Бк/кг по ^{137}Cs , 17 000 Бк/кг по $^{239+240}\text{Pu}$, 10 000 Бк/кг по ^{90}Sr , 20 000 Бк/кг по ^{152}Eu и 1000 Бк/кг по ^{154}Eu . Однако полученные результаты не подтвердили ожидаемых численных значений радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs в воде озера. Это говорит об отсутствии их поступления из предполагаемых источников загрязнения водоема путем выщелачивания из грунтов навала и донных отложений, а также привноса с подземными водами.

Из техногенных радионуклидов в воде озера были обнаружены ^3H и ^{90}Sr , активность которых находилась в диапазоне от 160 до 20 000 Бк/кг и от 1 до 15 Бк/кг соответственно. Во всех случаях минимальные значения радионуклидов наблюдаются в верхних слоях водной толщи озера в пределах 10–20 м, максимальные — на глубинах 60–80 м.

Наблюдения показали стабильность распределений ^3H и ^{90}Sr по глубине озера с течением времени, за исключением верхнего слоя озера (до 20 м), где в период зимнего промерзания поверхности воды концентрация ^3H увеличивается от 160 до 1000 Бк/кг. Наблюдаемая стабильность распределений ^3H и ^{90}Sr показывает на отсутствие процессов водообмена озера на глубине ниже 20 м.

Для выявления источников формирования радионуклидного загрязнения проведен сравни-

тельный анализ значений ^{90}Sr и Sr стабильного в одних и тех же отобранных пробах воды. Источником радионуклидного ^{90}Sr могут являться как грунты и донные отложения озера, так и привнос с подземными водами. В последнем случае распределение ^{90}Sr должно отличаться от распределения Sr стабильного. Результаты сравнения представлены на рис. 11.

Наблюдения за ^{90}Sr и Sr стабильным, между которыми обнаруживается тесная корреляция, подтверждает их происхождение из одного источника, которыми вероятнее всего являются грунты навала и донные отложения озера, поскольку основное количество Sr стабильного в водные экосистемы поступает преимущественно из почвенных горизонтов в результате инфильтрации атмосферной влаги сквозь почвогрунты.

Для озер умеренного климата выделяются две крупные термические фазы: нагревание (весеннее и летнее) и охлаждение (осеннее и зимнее). Весеннее нагревание начинается с появлением положительных температур весной. В это время на поверхности озера лежит лед, а верхние слои воды имеют самую низкую температуру. Такая термическая ситуация получила название обратной стратификации. Нагревание или охлаждение верхних слоев водной толщи озера приводит либо к перемешиванию воды, либо к расслоению (стратификации) водной толщи по плотности [16, 17]. Результаты термометрии показали наличие зоны изменения температуры (термоклин) в водоеме "Атомное озеро". Обнаруженная зона находится на глубине до 20 м, где в течение годового хода происходят процессы внешнего водообмена за счет тепловой конвекции и ветра перемешивания. Глубже этого горизонта озеро не подвержено циркуляции воды за счет внешних физических процессов. В связи с этим можно сказать, что основным механизмом, влияющим на глубинное распределение и стабильность радионуклидов ^3H и ^{90}Sr , является стратификация водной толщи из-за растворенных химических соединений. Значения минерализации между верхним и придонным слоем озера различаются в 2 раза, минимальные содержания составляют 10 г/л в приповерхностном слое воды до глубин 10–20 м, а максимальные величины — в придонном слое воды с минерализацией в 20 г/л, что приводит к повышению плотности воды по мере увеличения глубины, и таким образом — к застоному режиму озера [18].

ВЫВОДЫ

1. Техногенных радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{137}Cs в водоеме "Атомное озеро" не обнаружено. Из техногенных радионуклидов обнаружено наличие ^3H и ^{90}Sr с активностью от 160 до 20 000 Бк/кг и от 1 до 15 Бк/кг соответственно. Во всех случаях

минимальные значения радионуклидов наблюдаются в верхних частях озера в пределах 10–20 м, максимальные – на глубинах 60–80 м.

2. Наблюдения показали стабильность распределений ^3H и ^{90}Sr по глубине озера с течением времени. За исключением верхнего слоя озера (до 20 м), где в период зимнего промерзания поверхности воды концентрация ^3H увеличивается от 160 до 1000 Бк/кг.

3. Установлено, что основным механизмом, влияющим на глубинное распределение и стабильность радионуклидов ^3H и ^{90}Sr , является стратификация водной толщи из-за растворенных химических соединений.

4. Результаты термометрии позволили выделить зоны изменения (водообмена). Обнаруженная зона находится на глубине до 20 м, где в течение годового хода происходят процессы внешнего водообмена за счет тепловой конвекции и ветроперемешивания. Глубже этого горизонта озеро не подвержено циркуляциям воды за счет внешних физических процессов.

Таким образом, водоем “Атомное озеро” имеет сформировавшийся и устойчивый характер распределения исследованных компонентов на определенных глубинах в течение длительного периода времени. Источниками ^3H и ^{90}Sr загрязнения воды являются береговые грунты навала. Главным механизмом, влияющим на распределение радионуклидов по глубине, является стратификация водной толщи из-за плотностной конвекции в водной толще, обусловленной изменениями температуры и солености воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Актаев М.Р., Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н.* Особенности распределения трития в основных водных объектах СИП (“Атомное” озеро и р. Шаган) // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. 24–26 сентября 2014 г. Павлодар: Дом печати, 2014. 41 с. ISBN 978-601-7112-85-1.
2. *Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н., Генова С.В. и др.* Радиоактивное загрязнение вод реки Шаган (по результатам 2011-го года) // Актуальные вопросы радиозащиты Казахстана. Вып. 4. Т. 1. Сборник трудов Национального Ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 гг. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2013. С. 249–256.
3. *Актаев М.Р., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О.* Мониторинг радиоактивного загрязнения вод р. Шаган // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: Тез. докл. V Междунар. науч.-практическая конф. Павлодар: Дом печати, 2012. С. 63–64.
4. Актуальные вопросы радиозащиты Казахстана. Вып. 2. Сборник трудов Национального Ядерного центра Республики Казахстан за 2007–2009 гг. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2010. С. 12–16.
5. *Ахметов М.А., Баядилов Е.М., Смагулов С.Г., Шуклин Г.С.* и др. Характеристика исходных данных радиационного состояния эпицентральной зоны объекта “Шаган” – экскавационного подземного ядерного взрыва для создания искусственного водохранилища” // Изв. НАН РК. Сер. физико-математическая. 1994. № 6. С. 79–97.
6. *Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Романенко В.В. и др.* Выявление путей миграции техногенных радионуклидов за пределы испытательной площадки “Балапан” // Актуальные вопросы радиозащиты Казахстана. Вып. 3. Т. 2. Сборник трудов Национального Ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г. / Под рук. С.Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2011. С. 161–231.
7. ГОСТ СТ РК Р 51593–2003. Вода питьевая. Отбор проб. Введ. 2005-01-01. Астана: Госстандарт, 2003. 14 с.
8. МИ 2143-91 РК “Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре”. Введ. 1998-06-02. Рег. № 5.06.001.98. М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991. 18 с.
9. СТП 17.66-92. $^{238,239,240}\text{Pu}$. Радиохимическая методика выделения из проб почвы и приготовления препаратов для альфа-спектрометрических измерений. Стандарт предприятия. Комплексная система управления качеством разработок. Введ. 1993-01-02. Санкт-Петербург: НПО “Радиовый институт им. В.Г. Хлопина”, 1993. 10 с.
10. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. Введ. 1999. Рег. № 5.05.008.99.
11. Методика определения содержания искусственных радионуклидов $^{239,240}\text{Pu}$, ^{90}Sr и ^{137}Cs в природных водах методом концентрирования. ИЯФ НЯЦ РК регистрационный № 0307/3 от 5.04.2001.
12. ISO 9698:2010 Water quality – Determination of tritium activity concentration – Liquid scintillation counting method. Enter 2010-12-15. Switzerland, 2010. 24 p.
13. ГОСТ 26449.1-85 “Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод”.
14. СТ РК ИСО 17294-2-2006. “Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС)”.
15. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан. Мероприятия 1. Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона: отчет РБП 038 (информационный, годовой) / ИРБЭ НЯЦ РК; рук. С.Н. Лукашенко. Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2015. С. 89.
16. *Богословский Б.Б.* Водный баланс и термика озер и водохранилищ: Уч. пособие. Л., 1979. 72 с.
17. Методика комплексных полевых исследований озерных экосистем: Уч. пособие. Иркутск, 1989. 144 с.
18. *Баянов Н.Г.* Гидрохимические показатели оз. Светлояр и их межсезонная динамика // Изв. РГО. 2008. Т. 140. Вып. 2. С. 28–41.

Research of Tritium Content in Soil in the Places of Nuclear Testing on the Territory of Semipalatinsk Test Site

M. R. Aktayev^{a,#}, S. N. Lukashenko^a, A. O. Aidarkhanov^a, O. N. Lyakhova^a,
T. S. Toktaganov^a, and I. V. Tokarev^b

^a Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

^b St. Petersburg State University, Scientific Park, Resource enter "Geomodel", St. Petersburg, Russia

[#] E-mail: Aktaev@nnc.kz

The "Atomic" lake is the result of the first Soviet industrial thermonuclear explosion with soil outburst, conducted in January 1965 and aimed at creation of artificial reservoirs in arid regions. The explosion was carried out in a warfare borehole (№ 1004), 700 mm in diameter at a depth of 180 m. As a result of explosion and subsequent filling of the crater with flood water, an artificial reservoir with the capacity of about 6 mln/m³ was formed. This paper provides findings about the present state of the lake reservoir that was formed after the thermonuclear explosion was conducted and the reservoir created. It has been found that micro-macro components (ions and water impurities) and artificial radionuclides concentration are characterized by spatial distribution in the reservoir. In each case, the lowest values can be observed on the surface (down to 10 m) of the lake, the highest ones – at the bottom (60–80 m). It has been found that a stable distribution nature of the components under study takes place at a depth starting with 20 m. Soils and lake bottom sediments are probable sources of radionuclide contamination. The basic mechanism affecting radionuclide distribution is water layer stratification associated with the salt content.

Keywords: body of water "Atomic lake", radionuclide tritium (³H), strontium (⁹⁰Sr), stable isotopes (²H/¹⁸O), micro-macro components, depth distribution