

Д.С. Ахметжанова^{1,2*}, М.А. Севериненко^{1,2}, В.Н. Глущенко¹,
Д.А. Байсейтов², В.А. Макарова¹, У.П. Козтаева¹

¹Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: akhmetzhanova@mail.ru

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА АЗГИР В ЗАПАДНОМ КАЗАХСТАНЕ

Полигон Азгир является одним из радиационно опасных объектов Казахстана. На полигоне в исследовательских целях для отработки технологии создания под землей полостей различного назначения в массиве каменной соли было осуществлено 17 подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в период 1966–1979 гг. В результате проведенных работ было создано 9 подземных полостей различного объема и на различной глубине.

В статье представлены результаты изучения микроэлементного и радионуклидного состава подземных вод полигона «Азгир», с учетом новых данных, полученных после бурения новых наблюдательных скважин в 2021 году. Показано, что значения удельных активностей искусственных радионуклидов в воде исследуемых скважин и колодцев находится на фоновом уровне и сопоставимо с многолетними данными радиоэкологического мониторинга на полигоне, что свидетельствует об отсутствии процессов миграции радионуклидов из подземных ядерных полостей в настоящее время. Локальным сборником подземных вод полигона является мульда «Ужунтатор», расположенная между соляными куполами Западный и Восточный Азгир. Подземные воды полигона также залегают отдельными разрозненными линзами.

Представлена оценка токсичности вод из наблюдательных скважин и колодцев по содержанию в воде тяжелых металлов с использованием индекса загрязнения тяжелыми металлами (НРІ). Доминирование химических элементов в подземных водах установлено в порядке Fe > Mn > Ni > Cr > Co > Mo > Cu > Zn. Подтверждены выводы о непригодности этих вод для использования в питьевых целях. Значение индекса НРІ до 72,6 раз превышает критическое значение для питьевых вод, что обусловлено гидрогеологическими условиями залегания подземных вод.

Исследование проведено на базе Центра комплексных экологических исследований РГП Институт ядерной физики.

Ключевые слова: подземные воды, подземные ядерные полости, радионуклиды, тяжелые металлы, индекс загрязнения тяжелыми металлами, испытательный полигон Азгир.

D.S. Akhmetzhanova^{1,2*}, M.A. Severinenko^{1,2}, V.N. Gluchshenko¹,
D.A. Baiseitov², V.A. Makarova¹, U.P. Koztaeva¹

¹The Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: akhmetzhanova@mail.ru

Assessment of the radiation-ecological state of groundwater on the territory of the former Azgir test site in Western Kazakhstan

The Azgir test site is one of the radiation hazardous facilities in Kazakhstan. At the test site, for research purposes, 17 underground nuclear explosions were carried out in the period 1966–1979 to develop the technology of creating cavities for various purposes underground in the rock salt massif. As a result of the work carried out, 9 underground cavities of different volumes and at different depths were created.

The article presents the results of studying the trace element and radionuclide composition of the ground water of the Azgir test site, taking into account new data obtained after drilling new observation wells in 2021. It is shown that the values of specific activities of artificial radionuclides in the water of the bore holes and wells under study are at the background level and are comparable with long-term data of radioecological monitoring at the test site, which indicates the absence of migration processes of

radionuclides from underground nuclear cavities at the present time. The local collection of underground water of the test site is the "Uzhuntator" mulda, located between the salt domes of the Western and Eastern Azgir. The underground water of the test site also lie in separate disparate lenses.

An assessment of the toxicity of waters from observation the bore holes and wells by the content of heavy metals in water using the heavy metal pollution index (HPI) is presented. The dominance of chemical elements in groundwater is established in the order $Fe > Mn > Ni > Cr > Co > Mo > Cu > Zn$. The conclusions about the unsuitability of these water for drinking purposes have been confirmed. The value of the HPI index is up to 72.6 times higher than the critical value for drinking water, which is due to the hydrogeological conditions of groundwater occurrence.

The study was conducted on the basis of the Center of Complex Environmental Research of the RSE Institute of Nuclear Physics.

Key words: groundwater, underground nuclear cavities, radionuclides, heavy metals, heavy metal pollution index, Azgir test site.

Д.С. Ахметжанова^{1,2*}, М.А. Севериненко^{1,2}, В.Н. Глущенко¹,
Д.А. Байсейтов², В.А. Макарова¹, У.П. Козтаева¹

¹ Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

² Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: akhmetzhanoova@mail.ru

Батыс Қазақстандағы бұрынғы Азғыр сынақ полигоны аумағындағы жерасты суларының радиациялық-экологиялық жай-күйін бағалау

Азғыр полигоны Қазақстанның радиациялық қауіпті нысандарының бірі болып табылады. 1966-1979 жылдар аралығында полигонда зерттеу мақсатында жер астында әртүрлі мақсаттағы қуыстар жасау технологиясын пысықтау үшін 17 жерасты ядролық жарылыстары (ЖЯЖ) жүзеге асырылды.

Мақалада 2021 жылы жаңа бақылау ұңғымаларын бұрғылағаннан кейін алынған жаңа деректерді ескере отырып, «Азғыр» полигонының жер асты суларының микроэлементтік және радионуклидтік құрамын зерттеу нәтижелері берілген. Зерттелетін ұңғымалар мен құдықтардың суындағы жасанды радионуклидтердің үлестік белсенділігінің мәні фондық деңгейде және полигондағы радиоэкологиялық мониторингтің көп жылдық деректерімен салыстырмалы түрде көрсетілген, бұл қазіргі уақытта жерасты ядролық қуыстарынан радионуклидтердің миграциялық процестерінің жоқтығын көрсетеді. Полигонның жер асты суларының оқшау жинағы Батыс және Шығыс Азғыр тұз күмбездері арасында орналасқан «Ужунтатор» ойысы болып табылады. Полигонның жер асты сулары да бөлек-бөлек линзалар түрінде орналасқан.

Ауыр металдармен ластану индексі (HPI) пайдалана отырып, судағы ауыр металдардың құрамы бойынша бақылау ұңғымалары мен құдықтардан алынған сулардың уыттылығын бағалау ұсынылған. Жер асты суларындағы химиялық элементтердің үстемдігі $Fe > Mn > Ni > Cr > Co > Mo > Cu > Zn$ тәртібінде орнатылған. Нәтижесінде бұл сулардың ауыз суы мақсатында пайдалануға жарамсыздығы туралы тұжырымдар расталды. HPI индексінің мәні ауыз су үшін сыни мәннен 72,6 есеге дейін асып түседі, бұл жер асты суларының гидрогеологиялық жағдайларына байланысты.

Зерттеу «Ядролық физика институты» РМК Кешенді экологиялық зерттеулер орталығының базасында жүргізілді.

Түйін сөздер: жерасты сулары, жерасты ядролық қуыстары, радионуклидтер, ауыр металдар, ауыр металдармен ластану индексі, Азғыр сынақ полигоны.

Введение

В 1965-1987гг. на территории республики Казахстан было проведено 39 мирных подземных ядерных взрывов для нужд народного хозяйства, из них 17 были выполнены на полигоне «Азгир», расположенном в Курмангазинском районе Атырауской области в Западном Казахстане. С 1964 г. на полигоне были развернуты работы по опытно-промышленным исследованиям для отработки технологии создания с помощью

камуфлетных ядерных взрывов в массивах каменной соли подземных полостей, предназначенных в качестве хранилищ большого объема. Работы проводились на 10 технологических площадках А1-А5, А7-А11, на глубине от 165 до 1500 м (рисунок 1) (Глущенко, 2020 б:21).

Место проведения подземных ядерных взрывов выбиралось тщательно. Полигон расположен на соляно-купольном поднятии Большой Азгир, на западной периферии Прикаспийской соленосной провинции, расположенной к северу от

Каспийского моря. Солянокупольное поднятие Большой Азгир представляет собой два крупных соляных купола – Западный и Восточный Азгир, геологически разделенных компенсационной мульдой Ужунтатор. Местами на этой территории соляной купол выходит на дневную поверхность, представляя собой смесь песчаных почв с преобладанием соли. Технология проведения ядерных взрывов предусматривала полное исключение попадания продуктов ядерного взрыва на дневную поверхность и в геологические структуры. При проведении подземного ядерного взрыва в глубине массива каменной соли, при воздействии высоких температур, каменная соль расплавлялась, растекалась по стенкам полости и застывала в виде прочного стеклообразного барьера, препятствующего выходу продуктов ядерного взрыва. Однако при проведении взрывов произошел ряд нештатных ситуаций. При проведении взрыва на площадке А-9 произошел непреднамеренный провал грунта диаметром 600 м и глубиной 35 м., который впоследствии стал заполняться талой и дождевой водой. В настоящее время площадка А-9 представляет собой искусственное «озеро» объемом около 20 тыс. куб.м.. Пять полостей (А1-А5) после взрыва заполнились водой, две полости А7 и А10 заполнились водой частично. Растворившая в себе соль, вода внутри полости представляет собой высокосолёный радиоактивный рассол. Полости А8 и А11 сухие. Боевые скважины после консервированы бетонной пробкой. После закрытия полигон получил статус радиационно-опасного объекта и стал являться объектом радиоэкологических исследований. Особое значение в этих исследованиях занимает изучение возможных процессов миграции радионуклидов из подземных ядерных полостей.

Подземный ядерный взрыв является одним из самых сильных техногенных воздействий на геологическую среду, приведший к изменению строения больших объемов подземных систем. Вокруг полости взрыва формируются зоны механического разрушения, которые в случае изменения геофизической ситуации могут являться каналами поступления радиоактивных рассолов из водонаполненных полостей в вышележащие водоносные горизонты и дневную поверхность. Главными путями возможной миграции радионуклидов из подземных полостей являются «полость взрыва – вмещающая геологическая среда – дневная поверхность» и «полость взрыва – вмещающая

геологическая среда – подземные воды». Только зная современное состояние этих геотехногенных систем можно строить прогнозы и предпринимать необходимые меры по снижению экологических рисков, связанных с этими опасными объектами.

С 1991 года на территории полигона и прилегающей территории РГП «Институтом ядерной физики» проведен ряд масштабных комплексных радиационно-экологических исследований, проведены рекультивационные мероприятия по обнаружению, изъятию и захоронению радиационно-загрязненного грунта и технологического металлолома, оставшихся после проведения взрывных и опытных работ. Территории технологических площадок полигона огорожены для исключения проникновения скота и местного населения, расставлены предупреждающие знаки радиационной опасности. Для охраны технологических объектов полигона, оперативного контроля радиационной обстановки (дозиметрия), непосредственно на месте действует Азгирская научно-производственная экспедиция РГП «Институт ядерной физики». Для контроля радиационно-экологической ситуации на полигоне и прилегающей территории с 2001 года функционирует система комплексного радиоэкологического мониторинга, предусматривающая два уровня: контроль текущей радиоэкологической ситуации на полигоне и контроль возможных процессов миграции радионуклидов из подземных ядерных полостей. Для контроля подземных вод на полигоне имеется парк наблюдательных пунктов. До 2021 года она включала 10 наблюдательных скважин и 5 колодцев (скважины: С-2001, С-2002, С-2003, С-2004, С-2005, С-2006, С-1064, С-1081, С-1084, С-2; колодцы: Азгир 1, Азгир 2, Азгир 4, Жартык, Булак). Наблюдательные скважины сосредоточены в местах геологического расположения соляных куполов Западный и Восточный Азгир, в ближайших к расположению подземных полостей точках. Входящие в систему мониторинга колодцы исторически были организованы местным населением в населенных пунктах и места водопоя скота и т.д. В 2021 для усовершенствования системы мониторинга подземных вод парк наблюдательных скважин был расширен шестью новыми наблюдательными скважинами, расположенными в зоне распространения мульды «Ужунтатор» (С-2007, С-2008, С-2009, С-2010, С-2011, С-2012). При выборе места размещения новых скважин принималось во внимание что

мульда Ужунтатор, расположенная между соляными куполами Западный и Восточный Азгир. В гидрогеологическом отношении, мульда может представлять локальный бассейн и играть роль сборника передвигающихся вод и содержащихся в них примесей (и при нарушении полостей

боевых скважин – возможно радионуклидов). Глубина наблюдательных скважин и колодцев составляет до 20 м., за исключением наблюдательной скважины С-1081 (40 м.). Схема расположения наблюдательных скважин на полигона «Азгир» представлена на рисунке 1.

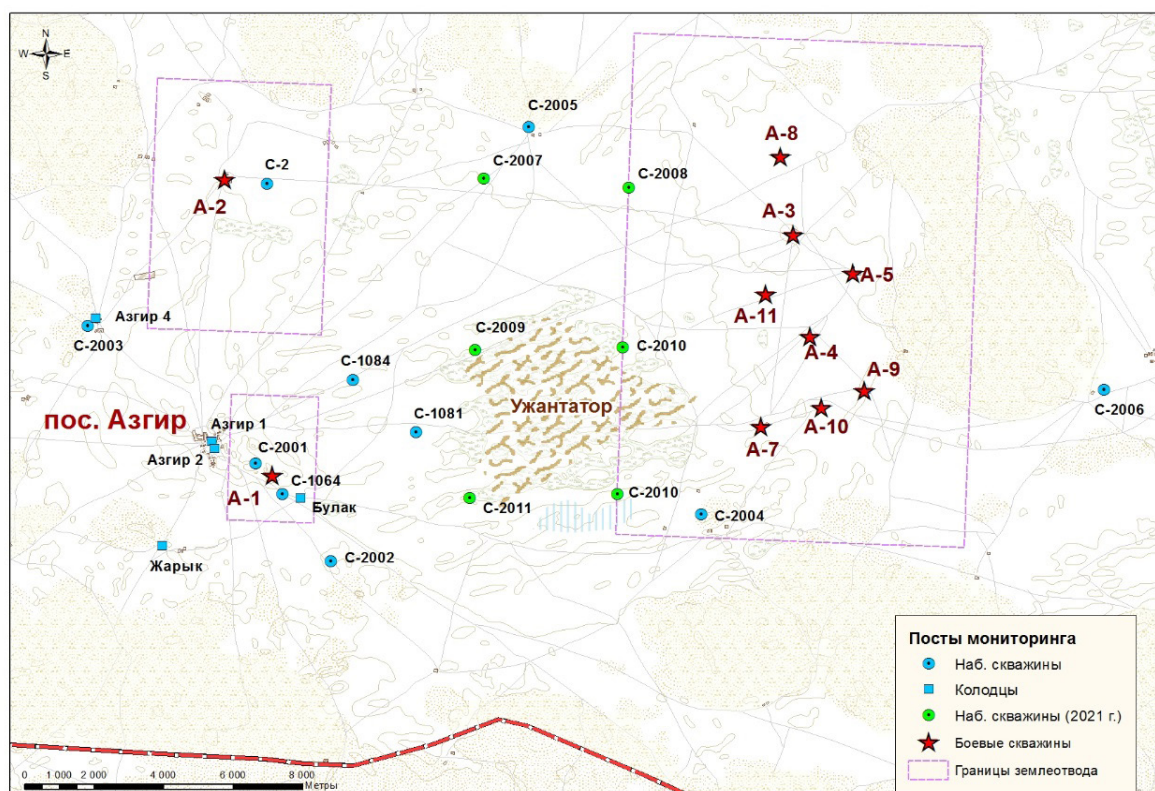


Рисунок 1 – Схема расположения наблюдательных скважин и колодцев системы комплексного радиоэкологического мониторинга полигона «Азгир» и прилегающих территорий

В представленной статье показаны результаты исследования подземных вод бывшего испытательного полигона «Азгир» с учетом новых данных, полученных после бурения новых наблюдательных скважин. Целью этих работ являлось изучение подземных вод первого водоносного горизонта на территории полигона, исследование их радионуклидного, элементного состава для углубления знаний о гидрогеологических условиях полигона, уточнения гидрогеологических условий полигона и отсутствия или наличия единого водоносного горизонта, связывающего между собой подземные полости и направления возможной миграции радионуклидов.

Материалы и методы

Солянокупольная тектоника и новейшие восходящие движения создали сложнейшие гидрогеологические условия для формирования химического состава верхних водоносных горизонтов. В пределах площади исследований и прилегающих к ней районов распространены подземные воды от соленых вод до рассолов, как по площади, так и в разрезе. На описываемой площади наиболее полно исследованы воды четвертичных отложений, глубина залегания грунтовых вод в аллювиальных отложениях зависит от рельефа пойменной террасы и уровня поверхностных вод в водоемах и изменяется от 0,5 до

6,8 м. Схема распространения водоносных горизонтов полигона, составленная на основе архивных материалов представлена на рисунке 2.

В стратиграфической последовательности гидрогеологические подразделения расположены следующим образом (Мясников, 1996а:56; Мясников, 1996б:23; Мясников, 1997:102)

- водоносный горизонт современных эоловых отложений (vQIV) распространен в виде пятен незакрепленных песчаных массивов. Подземные воды приурочены к хорошо отвешанным пескам кварцевым, мелкозернистым. В силу своего неглубокого залегания (от 0,2 до 4,2 м) питание подземных вод получают за счет атмосферных осадков и весеннего снеготаяния. Обычно это плавающие линзы пресных и слабосоленых вод с минерализацией от 0,3-3,2 г/л. Химический состав воды меняется от гидрокарбонатных до хлоридно-сульфатных и магниевонариевых.

- водоносный горизонт современных озерносоровых отложений (IQIV) приурочен к локаль-

ным понижениям, иногда вытянутым в различных направлениях вплоть до кольцевых форм. Ужунтатор – крупная солончаковая мульда площадью 68 км². Водовмещающими породами являются илы, иловатые супеси и пески, насыщенные хлористыми или сернокислыми солями. Породы обладают коэффициентом фильтрации от 0,2 м/сут до 0,8 м/сут. Воды относятся к группе рассолов с минерализацией от 50 г/л до 120 г/л. По химическому составу воды хлоридные натриево-магниевые. Общая жесткость от 260,6 мг/экв до 730,0 мг/экв. Присутствует бром, йод, бор в больших количествах. Питание грунтовых вод идет за счет снеготаяния и инфильтрации дождевых вод;

- водоносный горизонт верхнечетвертичных хвалынских отложений (QIIIv). Подземные воды хвалыно-хазарских отложений развиты повсеместно и отсутствуют только в районе солянокупольных поднятий Балкудук и Большой Азгир, где эти отложения не получили развития.

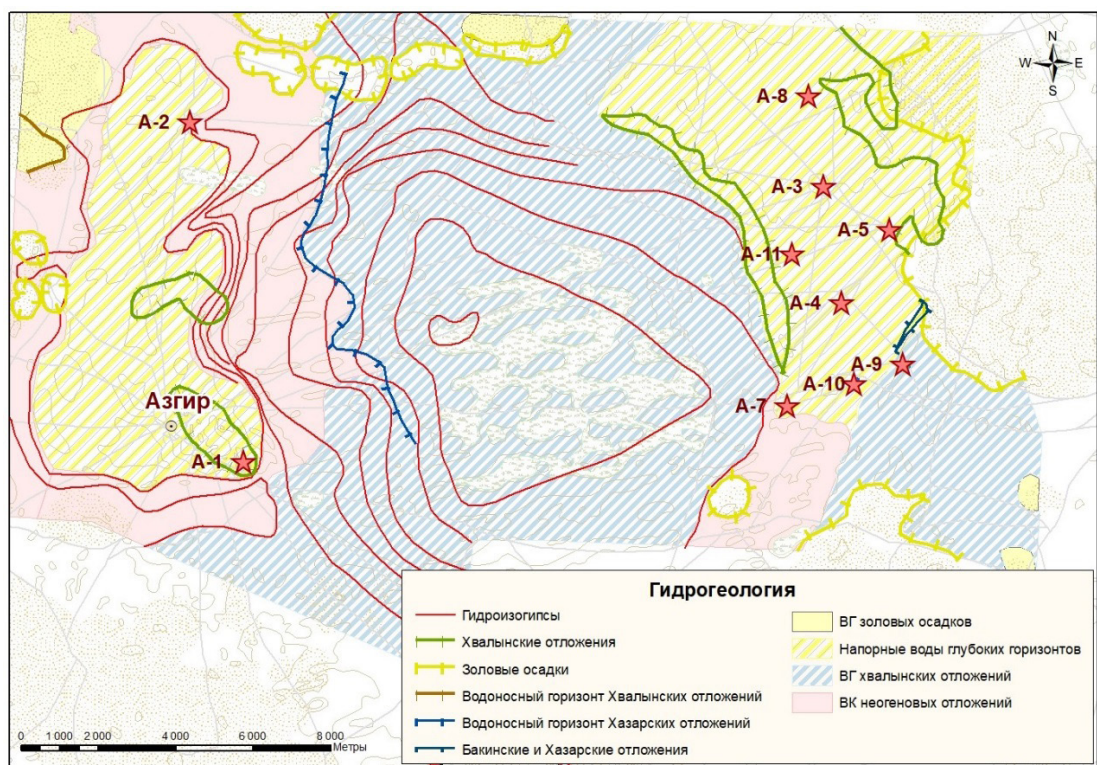


Рисунок 2 – Водоносные горизонты полигона Азгир по архивным материалам

В основе исследования подземных вод полигона, представленных в настоящей статье, лежат данные о результатах мониторинга за 2021 год. Аналитические испытания отобранных проб

проводились в аккредитованном на соответствие ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Центре комплексных экологических исследований РГП «Институт ядерной физики». Изучен радионуклидный со-

став воды по присутствию природных (^3H , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K) и техногенных (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$) радионуклидов и суммарной альфа- и бета-активности, а также элементный состав на содержание Na, Mg, K, Ca, V, Cu, Se, As, U, Hg, Cd, Ni, Pb, Al, Co, Cr, Mn, Fe, Ba, Zn, Sr, Li, Mo, Be, а также и общей минерализации (хлорид (Cl^-) и сульфат (SO_4^{2-}) ионов). При лабораторных анализах проб воды использовались методы инструментальной спектроскопии, радиохимический анализ и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Интерпретирование результатов лабораторных анализов проводилось с применением компьютерных технологий, включая Географическую информационную систему (для построения тематических карт), программ для анализа данных методами математической статистики. Применение методов математической статистики обусловлено тем фактом, что результаты микро- и макроэлементного анализа каждой пробы воды представлены 27 элементами (переменными) и проведение комплексного анализа данных, визуализации и осмысления результатов вручную невозможно. На первом этапе был выполнен анализ данных с помощью метода главных компонент (РСА анализ). Целями такого анализа являются сокращение числа переменных и определение структуры взаимосвязей между переменными, т.е. их классификация (Электронный учебник по статистике, 2022). Такая процедура помогла отсеять факторы, влияние которых на дальнейший анализ данных незначительно. На следующем этапе выполнена работа по разделению всей совокупности данных на группы, используя некоторую меру сходства между объектами. Решение этой задачи проведено с использованием кластерного анализа (это метод классификационного анализа, который предназначен для разбиения множества исследуемых объектов (образцов) и признаков на однородные группы, или кластеры) (Методы статистического анализа данных, 2022). В данном исследовании кластерный анализ проведен по совокупности содержания компонентов в пробе воды из разных (существующих и новых) скважин и колодцев.

Дополнительно к исследованию, связанному с математической обработкой данных по химическому составу вод существующих и новых наблюдательных скважин, проведена оценка степени токсичности вод по комплексному присутствию в ней тяжелых металлов. Для оценки

степени токсичности воды в зарубежной литературе широко используются такие индексы как НРІ (индекс загрязненности тяжелыми металлами), WQI (индекс качества воды) (Abdullah, 2013:63), EWQI (энтропийный индекс качества воды), ImpWQI (индекс улучшения качества воды) и др. Общей целью расчетов этих индексов является классификация проб воды по степени отношения комплексного содержания химических элементов в воде к стандарту воздействия или безопасных пределов загрязняющих веществ, которые устанавливаются национальными стандартами (Санитарные правила, 2015). В настоящем исследовании применялся Индекс загрязненности тяжелыми металлами (НРІ), представляющий собой одно число, которое обобщает общее качество воды в определенном месте и в определенное время на основе концентрации отдельных химических элементов (Singh et al., 2015:1920). НРІ основан на средневзвешенном арифметическом значении качества, которое присваивает рейтинг или весовую единицу (W_i) для каждого тяжелого металла (Jareda et al., 2016: 80) и рассчитывается по формуле:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

где W_i – удельный вес/весовая нагрузка, который обратно пропорционален рекомендуемому стандарту (S_i) (Руководство ВОЗ, 2022:329). соответствующего параметра (Martha et al., 2021).

$$W_i = \frac{1}{S_i} \quad (2)$$

где Q_i – это субиндекс i -го параметра, а V_i – измеренная концентрация i -го параметра в мкг/л.

$$Q_i = \frac{V_i}{S_i} \cdot 100 \quad (3)$$

На основе расчета индекса НРІ производится классификация воды НРІ от Ghaderpoori et al., 2018: 685

- < 100 низкий риск
- 100 пороговый риск
- >100 воды с высоким риском.

Как правило, критическое значение индекса загрязнения тяжелыми металлами НРІ принимается равным 100 (Singh et al., 2015: 1920).

В расчет индекса НРІ из всей совокупности данных об элементном составе подземных вод

из наблюдательных скважин и колодцев выбраны элементы, относящиеся к категории «тяжелые металлы»: Fe, Mn, Ni, Cr, Co, Mo, Cu, Zn.

Обзор литературы

На основании архивных отчетах ВНИПИ-промтехнология (Мясников, 1996а:56; Мясников, 1996б:23; Мясников, 1997:102; Жотабаев, 2006:60; Черепанов., 2003-2006:22; Дидичин, 1982:37; Дидичин, 1983:133), Института геофизических исследований (Тулеушев, 2010: 19) трехлетнего отчета РГП Институт ядерной физики (Глуценко, 2011: 8.) об исследовании экологического состояния подземных вод в ареале полигона, отчета РГП ИЯФ (Глуценко, 2021:42), в котором собраны сведения о результатах бурения новых наблюдательных скважин (С-2007-2012), авторами проанализированы данные и получены сведения о гидрогеологических условиях полигона «Азгир».

О современных результатах радиоэкологического мониторинга бывшего испытательного полигона «Азгир», материалы публикуются авторами из Института ядерной физики (Глуценко, 2019:174; Глуценко, 2021:38; Глуценко, 2020а:21; Глуценко, 2020б:13). Как следует из вышеуказанных источников, текущая радиационно-экологическая ситуация на полигоне стабильна. Демонстрируется высокая эффективности проведенных на полигоне дезактивационных мероприятий и результативность существующей системы мониторинга. При этом привлекается внимание к тому, что, несмотря на отсутствие техногенного загрязнения дневной поверхности и подземных вод полигона, мониторинг и исследования на полигоне необходимо продолжать.

Являясь участниками исследований на полигоне «Азгир», авторы настоящей статьи представляют результаты собственных работ, проведенных в 2021 году.

Результаты и обсуждение

Радионуклидный состав подземных вод

По результатам гамма-спектрометрического и радиохимического анализа проб воды из новых скважин (таблица 1) видно, что значения удельных активностей большинства изученных техногенных радионуклидов находятся значительно ниже установленного норматива для Казахстана – уровень вмешательства (УВ) (Гигиенические нормативы, 2022), что свидетельствует об отсутствии радиационного загрязнения подземных вод. Максимальное значение удельной активности Cs-137 не превышает 0,38 Бк/л, Pu-239+240 – 7,7 мБк/л, H-3 – 8,5 Бк/л, что многократно ниже нормируемых показателей. *Отсутствие трития, как одного из наиболее миграционно-активных радионуклидов (Kryazhych, 2017:62), образующихся при ядерном взрыве и находящихся в подземной полости, также показывает об отсутствии процессов миграции.*

Суммарная альфа- и бета-активность воды в отдельных пробах немного превышает норматив «допустимый уровень» (ДУ) (Об утверждении гигиенических нормативов..., 2022), что обусловлено присутствием в них природных радионуклидов уранового ряда (Ra-226 и Th-232) что характерно для Западного Казахстана. Повышенные значения удельной активности Th-232 в воде новых скважин, скорее всего, обусловлено природными геологическими процессами выщелачивания из горных пород, и это процесс будет изучен в ходе дальнейшего мониторинга.

Таблица 1 – Средние значения (за весну и осень 2021) удельной активности естественных и техногенных радионуклидов в пробах воды существующих и новых скважин

Скважина / колодец	K-40, Бк/л	Th-232, Бк/л	Ra-226, Бк/л	Pu-239+240, мБк/л	Sr-90, мБк/л	Cs-137, Бк/л	H-3, Бк/л	$\Sigma\alpha$	$\Sigma\beta$
С-2001	11,5	0,28	0,42	0,18	31,70	0,36	8,5	0,42	0,15
С-2002	12,5	0,30	0,41	7,68	18,55	0,32	6,0	0,14	0,10
С-2003	12,5	0,29	0,42	7,60	18,35	0,37	6,5	0,07	0,15
С-2004	12,0	0,29	0,40	0,16	20,40	0,38	7,5	0,14	0,15
С-2005	12,5	0,29	0,42	0,17	23,70	0,37	6,0	0,12	0,35

Скважина / колодец	K-40, Бк/л	Th-232, Бк/л	Ra-226, Бк/л	Pu-239+240, мБк/л	Sr-90, мБк/л	Cs-137, Бк/л	H-3, Бк/л	Σa	ΣB
С-2006	12,5	0,37	0,40	0,19	20,45	0,37	7,0	0,30	0,25
С-1084	12,0	0,40	0,43	0,17	42,15	0,38	7,0	0,12	0,20
С-1081	11,5	0,37	0,42	0,31	24,30	0,33	6,0	0,06	1,10
С-1064	11,0	0,47	0,41	0,19	51,05	0,34	6,5	0,40	0,50
Скв. С-2	12,5	0,27	0,46	0,21	19,55	0,35	8,5	0,24	0,10
к.Жартык	12,5	0,33	0,44	0,20	52,55	0,38	8,5	0,33	0,15
к.Булак	12,5	0,59	0,43	0,19	17,00	0,36	7,0	0,27	0,10
к.Азгир-1	12,5	0,27	0,42	0,21	17,15	0,35	6,5	0,13	0,25
к.Азгир-2	12,5	0,44	0,42	0,21	28,20	0,37	8,5	0,40	0,40
к.Азгир-4	12,0	0,28	0,42	0,27	17,75	0,33	8,0	0,29	0,10
С-2007	13,0	1,73	0,44	0,16	16,3	0,34	6,0	0,02	0,10
С-2008	12,0	0,93	0,42	0,18	17,0	0,36	6,0	0,02	0,10
С-2009	12,0	1,47	0,45	0,21	36,2	0,35	6,0	0,24	0,10
С-2010	11,0	0,89	0,41	0,14	64,0	0,35	8,0	1,0	0,20
С-2011	12,0	1,63	0,64	0,21	30,5	0,35	6,0	0,58	0,20
С-2012	12,0	1,27	0,43	0,17	17,3	0,34	6,0	0,64	0,10
УВ	-	0,6	0,49	1100	4900	11	7600	0,20	0,10

Макро-и микроэлементный состав и общая минерализация подземных вод

Для оценки результатов лабораторных исследований подземных вод проведен анализ макро-, микроэлементного состава и общей минерализации подземных вод всех (существующих и новых) наблюдательных скважин и колодцев. Согласно одной из целей исследования, анализ данных проведен для попытки установления связи между химическим составом воды исследуемых скважин и уточнения гидрогеологической обстановки на полигоне. По результатам анализа главных компонент (РСА анализ) (рисунок 3) получено, что вес переменных (значений концентрации химических элементов) изменяются от 0,99 до 0,58. Для последующей обработки была отобрана совокупность тех данных, которые представляют наибольший статистический интерес, а именно 12 переменных с весом близким к 0,9 – это концентрация аниона Cl⁻, общая минерализация и микроэлементов Na, Mg, Li, Cu, Co, K, Ca, Fe, Ba, Sr.

Выявленная первая главная компонента описывает 68% данных, вторая – 23% (рисунок 4). Таким образом, первые две главные компоненты описывают 91% данных, то есть для анализа 12 переменных (элементов) далее можно использовать только две переменные (две главные компоненты).

При проведении факторного анализа проб воды из наблюдательных скважин и колодцев были рассчитаны две главные компоненты (F1 и F2), которые описывают 91% данных. Результаты расчетов визуализированы в виде точечного графика Excel (рисунок 5).

На полученном графике можно выделить четыре группы, объединяющие скважины по химическому составу. Первая: скважина С-1064; вторая: скважины С-2007, С-2008, С-1084, С-2006, С-2, С-2005, С-2004, С-2003, С-2002 и колодцы Булак, Жартык, №1 и №4; третья: скважины С-2010, С-2009, С-2012, С-2011, С-1081; четвертая: скважина С-1064.

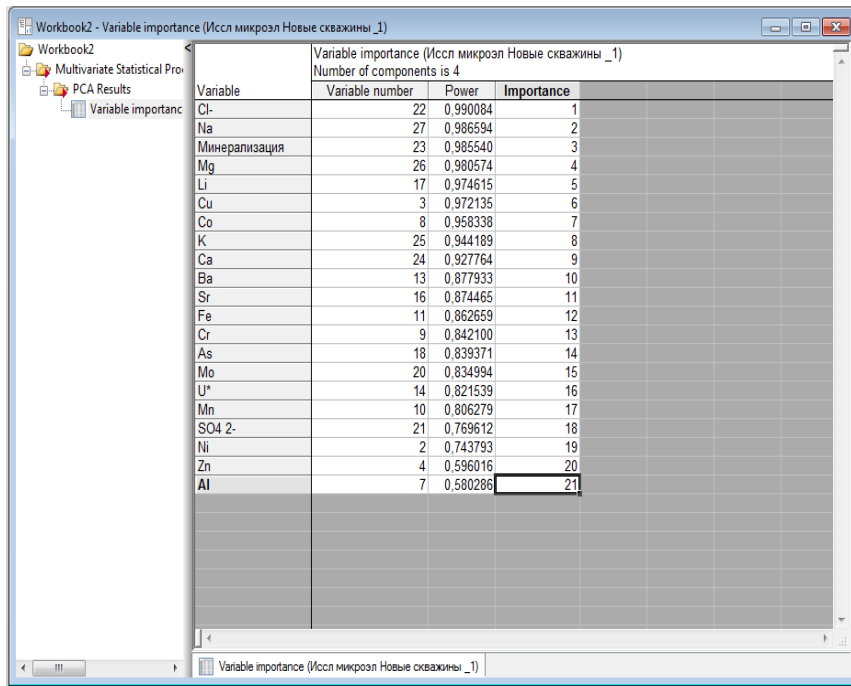


Рисунок 3 – Оценка важности переменных по данным PCA анализа.

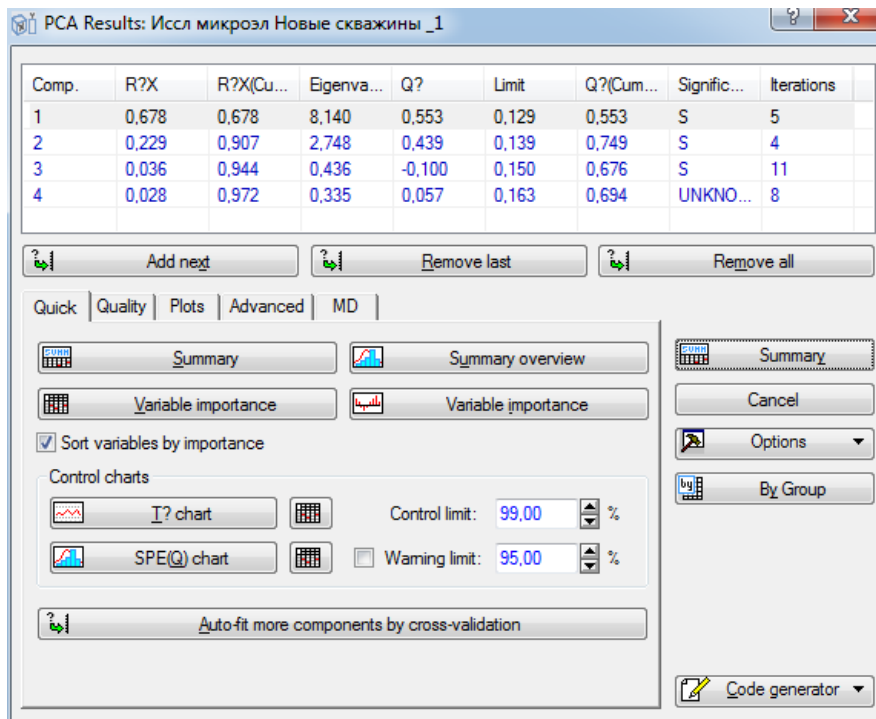


Рисунок 4 – Информация о главных компонентах, описывающих всю совокупность данных

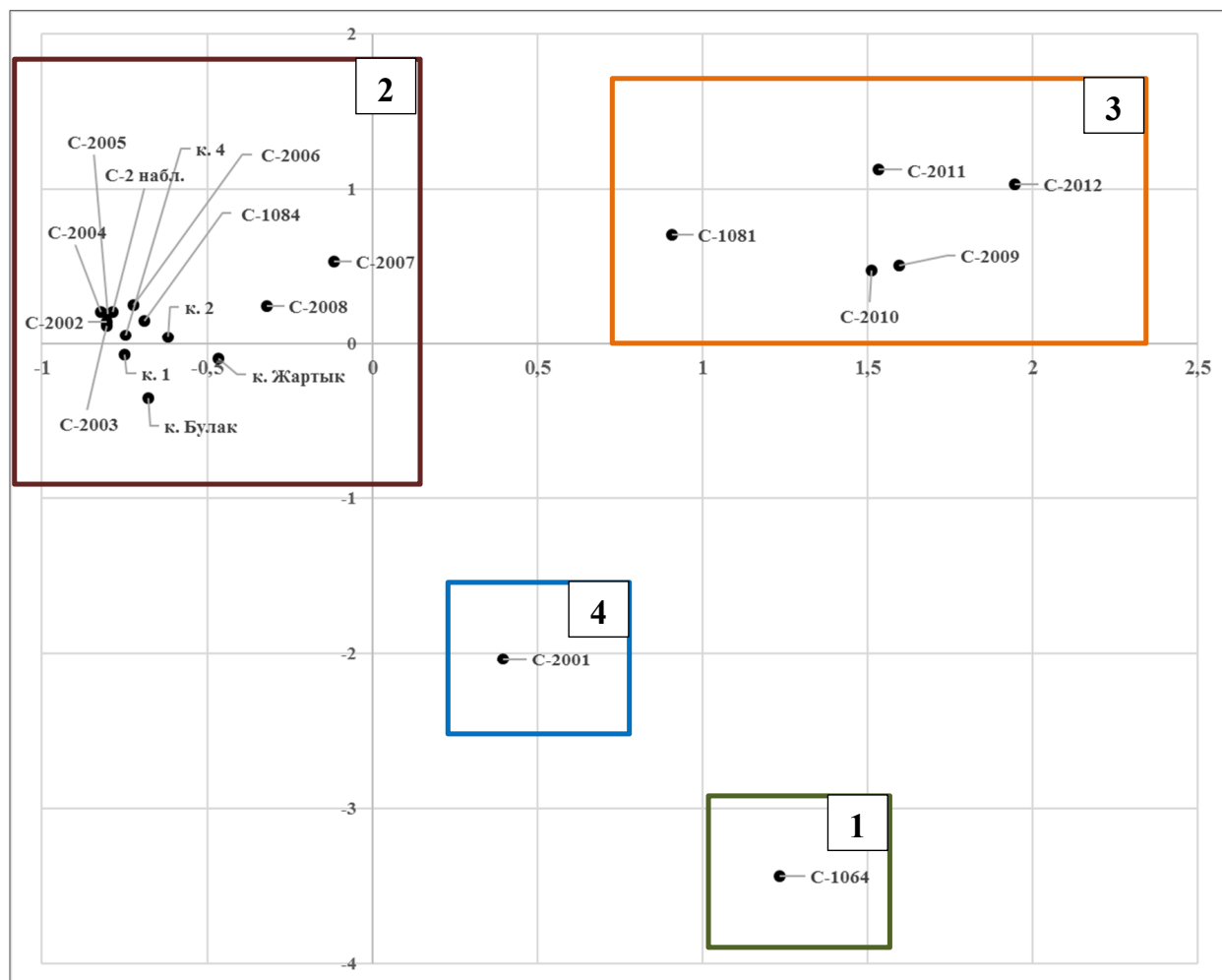


Рисунок 5 – Результаты многомерного факторного анализа по данным элементного состава водных проб из существующих и новых наблюдательных скважин

Результаты кластерного анализа, проведенного для проверки результатов расчета в виде древовидной диаграммы представлены на рисунке 6.

На полученной диаграмме можно выделить несколько кластеров – первый – скважина С-1064, второй – скважины С-2007, С-2008, С-1084, С-2006, С-2, С-2005, С-2004, С-2003, С-2002 и колодцы Булак, Жартык, №1 и №4, третий кластер – скважины С-2010, С-2009, С-2012, С-2011, С-1081, четвертый – скважина С-2001. При этом, вода из скважины С-1064 по микроэлементному составу более всего отличается от всех остальных скважин и колодцев. А вода скважины С-2001 небольшие различия с водой

из скважин, отнесенных к третьему кластеру. Таким образом, можно предположить, что каждый из выделенных кластеров характеризуется общим набором признаков и могут иметь общие черты (например, относиться к единому водоносному горизонту).

В результате кластерного и факторного анализа показан хорошо сходимый результат: по совокупности макро-, микроэлементного состава и общей минерализации выделяются четыре группы скважин, описанных выше. Путем наложения карты расположения подземных водоносных горизонтов, расположения наблюдательных скважин и результатов вышеприведенного анализа, построена карта, представленная на рисунке 7.

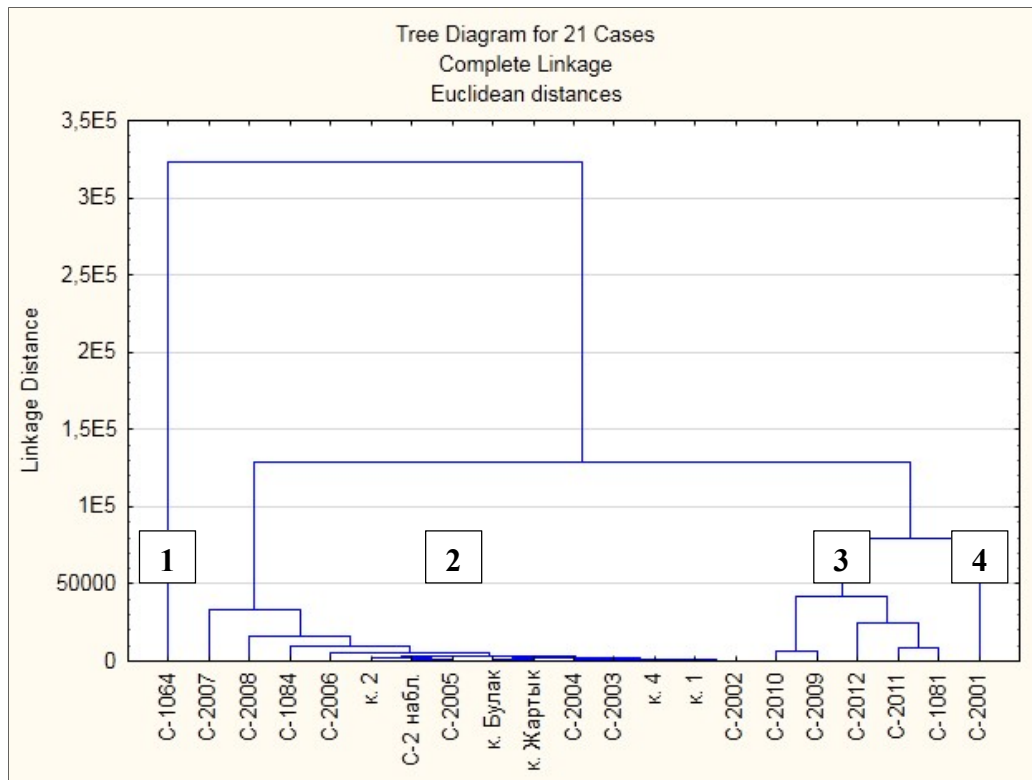


Рисунок 6 – Результаты многомерного кластерного анализа по данным элементного состава водных проб из существующих и новых наблюдательных скважин

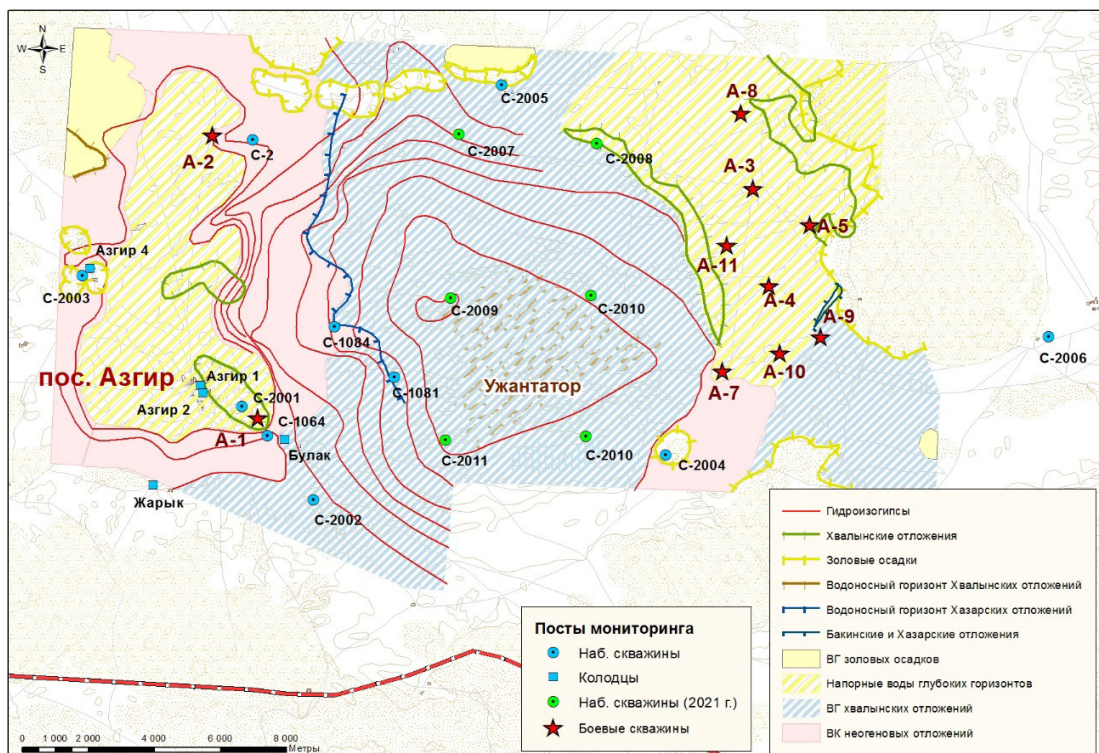


Рисунок 7 – Карта расположения водоносных комплексов и наблюдательных скважин и колодцев полигона «Азгир»

Таким образом, исходя из статистического анализа по макро-, микроэлементному составу и общей минерализации подземных вод существующих и новых скважин, а также анализа их совместного расположения (рисунок 7) следует:

- Скважина С-1064 и С-2001 имеют наибольшие отличия макро-, микроэлементного состава и общей минерализации от всех скважин и между собой, несмотря на их близкое расположение друг к другу и к колодцам Азгир (№1 и №2), Булак и Жартык. Подземные воды здесь могут быть представлены в виде отдельных мелких разрозненных линз.

- Скважина С-2006 имеет наибольшую удаленность от всех имеющихся скважин, однако имеет подземные воды, схожие по составу с С-2007, С-2008, С-1084, С-2, С-2005, С-2004, С-2003, С-2002. Вероятнее всего, подземные воды этих скважин имеют общие признаки, обусловленные природными факторами наличия геологических соляных структур, но являются представителями единого водоносного горизонта.

- Скважины С-2010, С-2009, С-2012, С-2011, С-1081, возможно расположены в зоне единого водоносного горизонта. Подтверждается предположение о том, что мульда Ужунтатор, расположенная между соляными куполами является локальным сборником подземных вод хвалынских отложений.

Ожидается, что более подробная картина о распространении подземных вод полигона будет получена после создания новых скважин в 2022 году, а также в ходе проведения мониторинга в последующие годы.

Оценка токсичности вод

На рисунке 8 представлены средние концентрации восьми тяжелых металлов для каждого источника воды в весенний и осенний периоды 2021 года, и соответствующие гигиенические стандарты качества вод Республики Казахстан стандартами (Санитарные правила, 2015).

Из результатов следует, что по содержанию Ni в пробах воды лишь в скважине С-1081 зафиксирована концентрация (153 мкг/л) превышающая максимально допустимый предел, который составляет по стандарту ВОЗ – 70 мкг/л, по стандарту РК – 100 мкг/л. Среднее значение составило 18,2 мкг/л.

По содержанию Cu, Zn, Co, Cr и Mo все полученные концентрации находятся в пределах допустимой нормы для каждого из заявленного элементов. Таким образом, максимальное значение Cu составило 66,1 мкг/л в весенний период,

57,5 мкг/л в осенний период в скважине С-1064 (ПДК по стандарту ВОЗ – 2000 мкг/л, РК – 1000 мкг/л). Средняя концентрация равна 10,5 мкг/л. Содержание Zn находится в незначительных пределах, максимальная концентрация которого равна 128 и 71 мкг/л в весенний и осенний периоды соответственно (колодец Азгир-4). При этом норма для Zn составляет 3000 мкг/л по стандарту ВОЗ и 5000 мкг/л по стандарту РК. Средняя концентрация – 17 мкг/л.

Средние значения для Co и Mo составляют 3,3 и 4,3 мкг/л соответственно. Максимальные значения Co зафиксированы в скважине С-1064, которые составили 24,1 мкг/л (весна) и 16,1 мкг/л (осень). Но превышающие допустимую норму в 100 мкг/л концентрации не зафиксированы. Аналогичная ситуация и по содержанию Mo в пробах воды, где фактические значения были значительно ниже допустимой нормы.

Иная картина складывается по содержанию Mn и Fe в исследованных пробах воды. В случае с Mn, только 5 из 30 исследованных проб соответствовали стандартам ВОЗ (80 мкг/л) и РК (100 мкг/л). При этом среднее значение Mn составило 1256 мкг/л, что в 12 раз превышает допустимую норму. Такие же результаты по содержанию Fe в воде, где максимально зафиксированная концентрация превышает допустимую норму в 696 раз, а среднее значение в 79 раз.

На основе полученных средних значений концентрации, с учетом нормативов для питьевых вод Казахстана были рассчитаны НРІ для каждого сезона и в целом для каждой точки отбора проб (таблица 2).

Как показано в таблице 2, высокие значения НРІ, превышающие критическое значение индекса загрязнения равным 100, наблюдались в ряде скважин в течение всех сезонов. Низкий уровень загрязненности тяжелыми металлами зафиксированы в местах отбора С-2002, С-2003, С-2004, С-2005, С-2006, С-2, к.Жартык, к.Азгир-4. В скважине С-2001 НРІ составил в среднем 954, что в ~9,5 раз превышает пороговое значение. НРІ в скважинах С-1084 и С-1081 составили в среднем 333 и 617 соответственно. Максимально зафиксированное среднегодовое значение НРІ составляет 7260 в скважине С-1064. В колодцах Булак, Азгир-1 и Азгир-2 индекс загрязненности тяжелыми металлами составило 214, 275 и 110 соответственно. То есть эти источники подземных вод представляют высокий уровень риска токсичности вод для питьевого использования.



Рисунок 8 – Концентрации тяжелых металлов в местах отбора проб в весенний и осенний периоды 2021 года

Таблица 2 – НРІ подземных вод наблюдательных скважин и колодцев за весенне-осенний период 2021 года

Скважина/колодец	НРІ
С-2001	954
С-2002	29
С-2003	70
С-2004	38
С-2005	37
С-2006	73
С-1084	333
С-1081	617
С-1064	7260
С-2	24
Жартык	42
Булак	214
Азгир-1	275
Азгир-2	110
Азгир-4	17
С-2007	796
С-2008	665
С-2009	4462
С-2010	2690
С-2011	6153
С-2012	2776

Таким образом, показано и еще раз подтверждено, что ряд проб грунтовых вод, отобранных их скважин и колодцев полигона «Азгир» содержат критические для здоровья человека концентрации тяжелых металлов. Высокие концентрации тяжелых металлов связаны с геологическими условиями района, контакта подземных вод с соляными геологическими структурами.

Заключение

В результате исследования подземных вод, проведенного на полигоне «Азгир» с применением новых данных, полученных после бурения в 2021 г. шести новых наблюдательных скважин показано, что подземные воды полигона, на глубине 20 м, не имеют признаков радиоактивного загрязнения. Удельная активность техногенных радионуклидов в подземных водах из новых наблюдательных скважин значительно ниже

гигиенических нормативов республики Казахстан и сопоставимо с удельными активностями радионуклидов в воде существующих скважин: Cs-137 (0,32-0,38 Бк/л), Sr-90 (16,3-64,0 Бк/л), Pu-239+240 (0,14 – 7,68 мБк/л). Не зафиксировано значимой удельной активности наиболее миграционно-активного радионуклида Н-3 (60-8,5 Бк/л) в пробах подземной воды из скважин.

Водоносный горизонт полигона на глубине 20 м. представлен в виде отдельных линз, а также имеется локальный бассейн, расположенный на месте мульды «Ужунтатор». Это определяет основной возможный путь миграции радионуклидов из подземных ядерных полостей. Располагаясь между двумя геологическими соляными куполами, именно мульда может являться сборником подземных вод на этой глубине. В точки зрения радиоэкологической безопасности, даже в случае появления процессов миграции радиоактивности из подземных полостей, загрязненные подземные воды будут направлены в этот локальный бассейн, где, вероятнее всего будут задерживаться. Следует отметить, что авторы ожидают получения более подробной картины о распространении подземных вод полигона после завершения второго этапа бурения скважин, намеченных на конец 2022 года, а также в ходе проведения мониторинга в последующие годы. Несмотря на то, что исследованием показано отсутствие миграции радионуклидов из подземных полостей в настоящее время, существуют постоянные опасения того, что в случае геофизических изменений геологических структур может быть спровоцировано постепенное разрушение стенок полости и выхода радиоактивности через зоны поствзрывной трещиноватости в подземные водоносные горизонты и дневную поверхность. Только регулярные наблюдения позволяют отслеживать текущую радиоэкологическую ситуацию для своевременного реагирования даже на самые малейшие изменения.

Расчет индекса токсичности вод с применением индекса НРІ, основанного на значении средней концентрации ряда тяжелых металлов (Ni, Cu, Zn, Co, Cr, Mo, Fe, Mn), демонстрирует высокий риск токсического воздействия. Полученный факт подтверждает предыдущие заключения (Глущенко, 2019:174, Глущенко, 2020:13) о непригодности подземных вод полигона для питьевых целей. Это связано с геологической структурой района.

Литература

- Глущенко В.Н. Отчет по Республиканской бюджетной программе 036 «Развитие атомных и энергетических проектов». Комплексный мониторинг бывшего полигона «Азгир» и прилегающих территорий / РГП «Институт ядерной физики». – Алматы, 2021.
- Глущенко В.Н., Макарова В.А., Нугманов Д.К. и др. История радиоэкологических исследований на полигоне Азгир. Ядерный потенциал Казахстана: Сборник докладов, вып.15. – Нур-Султан, 2020б. – С. 21-27.
- Глущенко В.Н., Макарова В.А., Севериненко М.А. и др. Оценка возможности использования в питьевых целях вод из колодцев поселков, прилегающих к полигону Азгир. Ядерный потенциал Казахстана: Сборник докладов, вып.15. – Нур-Султан, 2020а. – С. 13-20.
- Глущенко В.Н., Полешко А.Н., Моренко В.С. и др. Комплексный мониторинг полигона Азгир и прилегающих территорий. Тезисы II международного научного форума «Ядерная наука и технологии». РГП «Институт ядерной физики». – Алматы, 2019. – С. 174.
- Глущенко В.Н., Севериненко М.А., Макарова В.А. и др. Современная радиоэкологическая обстановка на бывшем испытательном полигоне «Азгир». Materials of the «Medical-biological environmental issues in Uranium mining regions». – Нур-Султан, 2021. – С.38-39.
- Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности. Приказ Министра здравоохранения РК от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71.
- Дидичин Н. А., Гусейнов А.Д и др. Отчет о результатах поисков подземных вод с целью водоснабжения 15 хозцентров Гурьевской области за 1981 г. – Алматы, 1982.
- Дидичин Н. А., Желтоножко Г.В. Отчет о результатах поисков подземных вод для водоснабжения 17 хозцентров Денгизского, Индерского и Кзыл-Кучинского районов Гурьевской области. – Алматы, 1983.
- Жотабаев Ж.Р., Гильманов Д.Г. Исследование зон деформации от ядерных взрывов на соляном куполе Азгир с целью выбора целостных массивов для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов (РАО). Отчет по программе МНТЦ/НЯЦ РК. –Курчатов, 2006.
- Глущенко В.Н. Заключительный отчет о научно-исследовательской работе / Исследование влияния полигона Азгир на экологическое состояние подземных вод. ДГП «Институт ядерной физики». – Алматы, 2011.
- Методы статистического анализа данных: <http://statlab.kubsu.ru/node/4> (04.10.2022)
- Мясников К.В., Лукишов Б.Г. Анализ и обобщение материалов по геологии, гидрогеологии и проведенным подземным ядерным взрывам на солянокупольном месторождении Большой Азгир. Отчет / Всероссийский проектно-изыскательный и научно-исследовательский институт промышленной технологии «ВНИПИПРОМТЕХНОЛОГИЯ» – Москва, 1996 а. – 56 с.
- Мясников К.В., Лукишов Б.Г. Анализ и обобщение материалов по геологии, гидрогеологии и проведенным подземным ядерным взрывам на солянокупольном месторождении Большой Азгир. Отчет / Всероссийский проектно-изыскательный и научно-исследовательский институт промышленной технологии «ВНИПИПРОМТЕХНОЛОГИЯ». –Москва,1997. – 23 с.
- Мясников К.В., Лукишов Б.Г. Геолого-гидрогеологическая характеристика солянокупольной структуры Большой Азгир. Отчет / Всероссийский проектно-изыскательный и научно-исследовательский институт промышленной технологии «ВНИПИПРОМТЕХНОЛОГИЯ». – Москва, 1996 б. – 102 с.
- Санитарные правила «Санитарно-эпидемиологические требования к источникам воды, местам забора воды для хозяйственно-питьевых целей, хозяйственно-питьевому водоснабжению и местам культурно-бытового водопользования и безопасности водных объектов». Приказ Мин. Нац. Эконом. Республики Казахстан от 16.03.2015 г. № 209.
- Тулешев А.Ж., Глущенко В.Н. Исследование влияния полигона Азгир на экологическое состояние подземных вод / Отчет ДГП «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК. – Алматы, 2010.
- Черепанов В.П., Отебай О.Б., Кадыргалиева Ж.К. Отчет о результатах работ по объекту «Комплексная геологическая, гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемки масштаба 1:200 000 с геоэкологическими исследованиями листа L-39-1 (полигон Азгир)». – Алматы, 2006.
- Электронный учебник по статистике: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (30.09.2022)
- Abdullah E.J. Evaluation of surface water quality indices for heavy metals of Diyala River-Iraq. J Nat Sci Res (2013): V.3(8). – pp.63–69.
- Jareda G., Dhekne P.Y. and Mahapatral S.P. Water quality index and heavy metal pollution index of bailadila Iron ore mine area and its peripherals. Int. J. Eng. Appl. Sci. (2016): V.3(12). – pp. 80-86.
- Ghaderpoori M., Kamarehie B., Jafari A, Ghaderpoury A.and Karami M. Heavy metals analysis and quality assessment in drinking water – Khorramabad city, Iran. Data in Brief, (2018): V.16. – pp. 685-692.
- Martha N.U. and Nnenedi A.K. Heavy metal pollution index of surface and groundwater from around an abandoned mine site, Klein Aub. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C (2021):V124, P1.
- Kryazhych O.and Kovalenko O. Some of the special features of the tritium migration. International scientific Journal of mathematical modeling in economy, No. 3-4 (9), July-December, 2017. – pp. 62-73.

Singh P.K., Verma P., Tiwari A.K., Sharma S. and Purty P. Review of various contamination index approaches to evaluate groundwater quality with geographic information system (GIS). *International Journal of ChemTech Research*, 7 (4) (2015). – pp.1920-1929

Singh P.K., Verma P., Tiwari A.K., Sharma S. and Purty P. Review of various contamination index approaches to evaluate groundwater quality with geographic information system (GIS). *International Journal of ChemTech Research*, 7 (4) (2015). – pp.1920-1929.

World Health Organization (WHO) . Guidelines for Drinking-Water Quality. Fourth edition incorporating the first and second addenda. World Health Organization; Geneva, Switzerland: 2022. – pp. 329–482.

References

Glushhenko V.N. Otchet po Respublikanskoj bjudzhetnoj programme 036 «Razvitie atomnyh i jenergeticheskikh proektov». Kompleksnyj monitoring byvshego poligona «Azgir» i prilegajushhih territorij / RGP «Institut jadernoj fiziki. – Almaty, 2021.

Glushhenko V.N., Makarova V.A., Nugmanov D.K. i dr. Istorija radiojekologicheskikh issledovanij na poligone Azgir. Jadernyj potencial Kazahstana: Sbornik dokladov, vyp.15. – Nur-Sultan, 2020b. – S. 21-27.

Glushhenko V.N., Makarova V.A., Severinenko M.A. i dr. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovanija v pit'evykh celjah vod iz kolodcev poselkov, prilegajushhih k poligonu Azgir. Jadernyj potencial Kazahstana: Sbornik dokladov, vyp.15. – Nur-Sultan, 2020a. – S. 13-20.

Glushhenko V.N., Poleshko A.N., Morenko V.S. i dr. Kompleksnyj monitoring poligona Azgir i prilegajushhih territorij. Tezisy II mezhdunarodnogo nauchnogo foruma «Jadernaja nauka i tehnologii». RGP «Institut jadernoj fiziki. – Almaty, 2019. – S. 174.

Glushhenko V.N., Severinenko M.A., Makarova V.A. i dr. Sovremennaja radiojekologicheskaja obstanovka na byvshego ispytatel'nom poligone «Azgir». Materials of the «Medical-biological environmental issues in Uranium mining regions. – Nur-Sultan, 2021. – S.38-39.

Gigienicheskiye normativy k obespecheniju radiacionnoj bezopasnosti. Prikaz Ministra zdavoohranenija RK ot 2 avgusta 2022 goda № QR DSM-71.

Didichin N. A., Gusejnov A.D i dr. Otchet o rezul'tatah poiskov podzemnyh vod s cel'ju vodosnabzhenija 15 hozcentrov Gur'evskoj oblasti za 1981 g. – Almaty, 1982.

Didichin N. A., Zheltonozhko G.V. Otchet o rezul'tatah poiskov podzemnyh vod dlja vodosnabzhenija 17 hozcentrov Dengizskogo, Inderskogo i Kzyl-Kuchinskogo rajonov Gur'evskoj oblasti. – Almaty, 1983.

Zhotabaev Zh.R., Gil'manov D.G. Issledovanie zon deformacii ot jadernyh vzryvov na soljanom kupole Azgir s cel'ju vybora celostnyh massivov dlja razmeshhenija punkta zahoroneniya radioaktivnyh othodov (RAO). Otchet po programme MNTC/NJaC RK. –Kurchatov, 2006.

Glushhenko V.N. Zakljuchitel'nyj otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote / Issledovanie vlijanija poligona Azgir na jekologicheskoe sostojanie podzemnyh vod. DGP «Institut jadernoj fiziki». – Almaty, 2011.

Metody statisticheskogo analiza dannyh: <http://statlab.kubsu.ru/node/4> (04.10.2022)

Mjasnikov K.V., Lukishov B.G. Analiz i obobshhenie materialov po geologii, gidrogeologii i provedjonnyh podzemnyh jadernym vzryvam na soljanokupol'nom mestorozhdenii Bol'shoj Azgir. Otchet / Vserossijskij proektno-izyskatel'nyj i nauchno-issledovatel'skij institut promyshlennoj tehnologii «VNIPIPROMTEHNOLOGIJA» – Moskva, 1996a. – 56 s.

Mjasnikov K.V., Lukishov B.G. Analiz i obobshhenie materialov po geologii, gidrogeologii i provedjonnyh podzemnyh jadernym vzryvam na soljanokupol'nom mestorozhdenii Bol'shoj Azgir. Otchet / Vserossijskij proektno-izyskatel'nyj i nauchno-issledovatel'skij institut promyshlennoj tehnologii «VNIPIPROMTEHNOLOGIJA». –Moskva,1997. – 23 s.

Mjasnikov K.V., Lukishov B.G. Geologo-gidrogeologicheskaja harakteristika soljanokupol'noj struktury Bol'shoj Azgir. Otchet / Vserossijskij proektno-izyskatel'nyj i nauchno-issledovatel'skij institut promyshlennoj tehnologii «VNIPIPROMTEHNOLOGIJA». – Moskva, 1996b. – 102 s.

Sanitarnye pravila «Sanitarno-jepidemiologicheskie trebovanija k istochnikam vody, mestam zabora vody dlja hozjajstvenno-pit'evykh celej, hozjajstvenno-pit'evomu vodosnabzheniju i mestam kul'turno-bytovogo vodopol'zovanija i bezopasnosti vodnyh ob#ektov». Prikaz Min. Nac. Jekonom. Respubliki Kazahstan ot 16.03.2015 g. № 209.

Tuleushev A.Zh., Glushhenko V.N. Issledovanie vlijanija poligona Azgir na jekologicheskoe sostojanie podzemnyh vod / Otchet DGP «Institut geofizicheskikh issledovanij» RGP NJaC RK. – Almaty, 2010.

Cherepanov V.P., Otebaj O.B., Kadyrgalieva Zh.K. Otchet o rezul'tatah rabot po ob#ektu «Kompleksnaja geologicheskaja, gidrogeologicheskaja i inzhenerno-geologicheskaja s#emki masshtaba 1:200 000 s geojekologicheskimi issledovanijami lista L-39-1 (poligon Azgir)». – Almaty, 2006.

Jelektronnyj uchebnik po statistike: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (30.09.2022)

Abdullah E.J. Evaluation of surface water quality indices for heavy metals of Diyala River-Iraq. *J Nat Sci Res* (2013): V.3(8). – pp.63–69.

Jareda G., Dhekne P.Y. and Mahapatral S.P. Water quality index and heavy metal pollution index of bailadila Iron ore mine area and its peripherals. *Int. J. Eng. Appl. Sci.* (2016): V.3(12). – pp. 80-86.

Ghaderpoori M., Kamarehie B., Jafari A, Ghaderpoury A.and Karami M. Heavy metals analysis and quality assessment in drinking water – Khorramabad city, Iran. *Data in Brief*, (2018): V.16. – pp. 685-692.

Martha N.U. and Nnenedi A.K. Heavy metal pollution index of surface and groundwater from around an abandoned mine site, Klein Aub. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* (2021):V124, P1.

Kryazhych O.and Kovalenko O. Some of the special features of the tritium migration. *International scientific Journal of mathematical modeling in economy*, No. 3-4 (9), July-December, 2017. – pp. 62-73.

Singh P.K., Verma P., Tiwari A.K., Sharma S. and Purty P. Review of various contamination index approaches to evaluate groundwater quality with geographic information system (GIS). *International Journal of ChemTech Research*, 7 (4) (2015). – pp.1920-1929.

Singh P.K., Verma P., Tiwari A.K., Sharma S. and Purty P. Review of various contamination index approaches to evaluate groundwater quality with geographic information system (GIS). *International Journal of ChemTech Research*, 7 (4) (2015). – pp.1920-1929.

World Health Organization (WHO) . *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Fourth edition incorporating the first and second addenda. World Health Organization; Geneva, Switzerland: 2022. – pp. 329–482.