

УДК 556.38
DOI:10.31660/0445-0108-2025-3-31-42
EDN: УТОНВР

Гидрогеологические исследования на этапе поисков пресных подземных вод в криолитозоне

В. И. Козырев*, Ю. В. Васильев

Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия

* *kozyrev-v@mail.ru*

Аннотация. Методика поисков пресных подземных вод криолитозоны как источников водоснабжения ограничена (несовершенна). Обеспечение водоснабжения в условиях распространения многолетнемерзлых пород связано со следующей проблемой, поскольку рассматриваемая территория относится к ледовой макроне, первого от поверхности водоносного комплекса четвертичных отложений, водоносная система которого состоит из разобщенных, вертикально ориентированных узких желобов подрусловых таликов рек, чашеобразных подоцерных и редких межмерзлотных таликов, с весьма ограниченными ресурсами пресных вод.

На этапе поисков пресных подземных вод в геологоразведочных работах для более надежного выделения перспективных участков предлагается применить технологию комплексирования методов исследований: дешифрирование материалов дистанционного зондирования земли с линеаментным анализом площади поисков, электроразведочный геофизический метод (метод зондирования становлением поля в ближайшей зоне) с методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР-зондирование).

В результате выполненных исследований были выделены перспективные участки для обнаружения пресных подземных вод, проведено поисково-разведочное бурение скважин на воду, выявлены запасы пресных подземных вод в приповерхностной 110–120-метровой зоне геологического разреза в пределах поисковой площади приемо-сдаточного пункта Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения в составе четвертичного водоносного комплекса.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, таликовые зоны, водоносная система, дистанционное зондирование земли, линеаментный анализ, электроразведочное зондирование, бурение скважин на воду, технология комплексирования исследований

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWZZ-2022-0015).

Для цитирования: Козырев, В. И. Гидрогеологические исследования на этапе поисков пресных подземных вод в криолитозоне / В. И. Козырев, Ю. В. Васильев. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-3-31-42 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 3. – С. 31–42. – EDN: УТОНВР

Hydrogeological investigations during the exploration of fresh groundwater in cryolithic zone

Vladimir I. Kozyrev*, Yuri V. Vasiliev

West Siberian Division of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

* *kozyrev-v@mail.ru*

Abstract. Technique for exploring fresh groundwater in cryolithic zone as a water supply remains limited and underdeveloped. Securing reliable water resources in regions underlain by continuous permafrost presents significant challenges. This is because of the fact that an area is located within an ice macro-zone. An ice macro-zone is the first water-bearing complex of Quaternary sediments from the surface, whose aquifer system consists of isolated, vertically oriented narrow troughs of underflow taliks of rivers, bowl-shaped subzero and rare interfrost taliks. All of which possess very limited fresh water reserves.

To enhance the identification of promising areas for fresh groundwater during the exploration stage, the technology of complexation of research methods is proposed. This technology involves the interpretation of earth remote sensing with lineament analysis of the search area, electrosppecting geophysical method (electromagnetic sounding in the near-field zone) with nuclear magnetic resonance (NMR) sounding.

As a result of this study, several promising sites for fresh groundwater were identified. Exploratory drilling was conducted, uncovering fresh groundwater reserves within the upper 110–120 meters of the geological section. These reserves are part of the Quaternary water-bearing complex located within the boundary of the custody transfer station at the Zapolyarnoye oil and gas condensate field.

Keywords: permafrost, talik zones, aquifer system, earth remote sensing, lineament analysis, electrical sounding, groundwater well drilling, technology of complexation of research methods

Acknowledgments: This work was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FWZZ-2022-0015).

For citation: Kozyrev, V. I., & Vasiliev, Yu. V. (2025). Hydrogeological investigations during the exploration of fresh groundwater in cryolithic zone. *Oil and Gas Studies*, (3), pp. 31-42. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-3-31-42

Введение

В пределах криолитозоны на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) основным надежным источником питьевого и технологического водоснабжения населения, объектов нефтепромыслов и промышленности являются подземные воды [1].

Гидрогеологические исследования проводились на поисковой площади приемо-сдаточного пункта (ПСП) Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), расположенного в 15 км севернее полярного круга.

По гидрогеологическому районированию территория относится к северной группе бассейнов стока подземных вод, структуре II порядка — Пур-Тазовскому бассейну, являющегося частью Западно-Сибирского мегабассейна [2]. В границах бассейна развит четвертичный водоносный комплекс (Q), в котором и сосредоточены ресурсы подземных вод приповерхностной части геологического разреза.

Объект и методы исследования

Четвертичный водоносный комплекс представляет собой сложно-слоистую песчано-глинистую толщу аллювиальных, озерно-аллювиальных, озерно-ледниковых и морских отложений верхнеплейстоцен-голоценового возраста, залегающих на глинах ирбитской свиты эоцена. Последние завершают разрез регионального водоупора турон-

эоценового возраста (K_2t-P_2), разделяющего мезозойский и кайнозойский гидрогеологические бассейны.

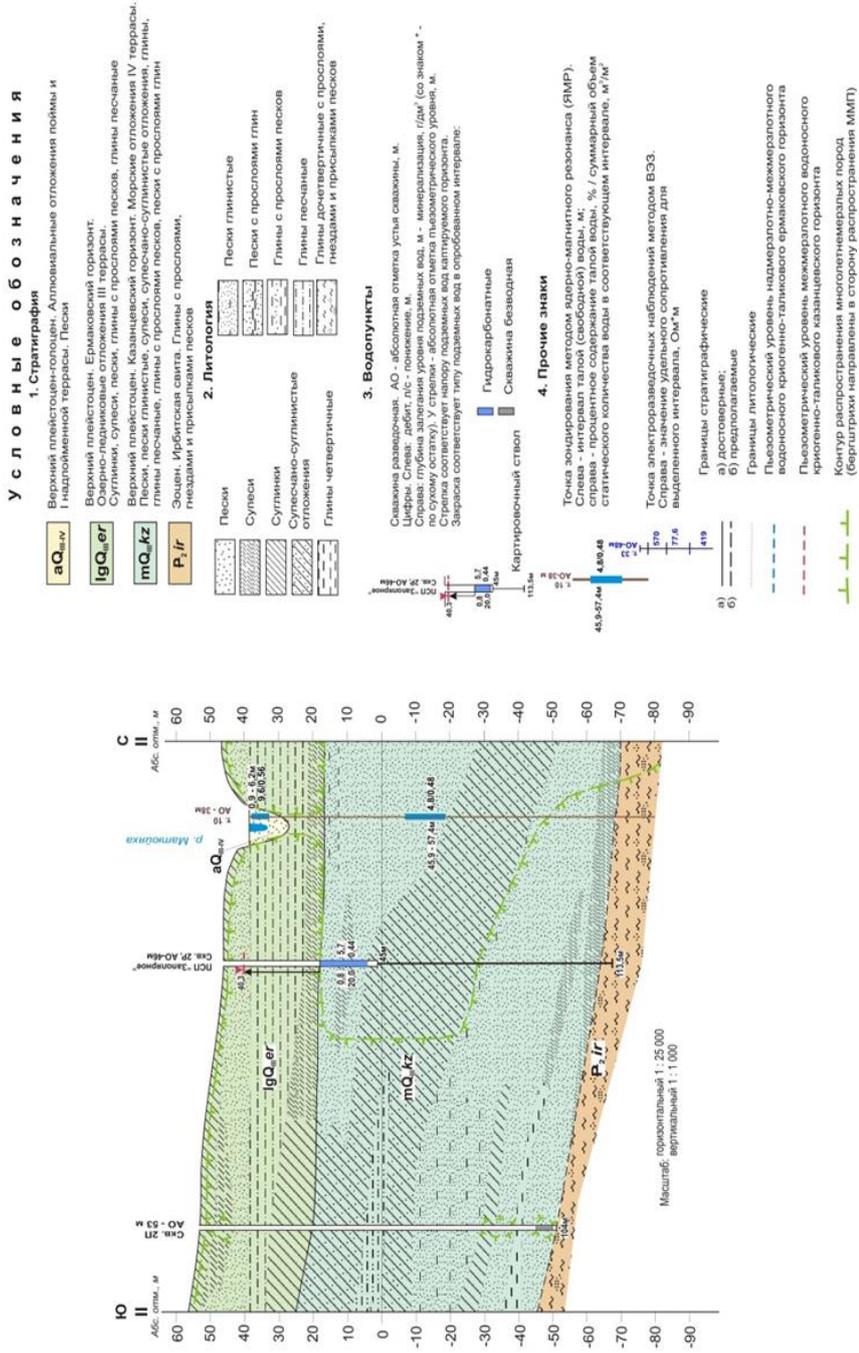
В приповерхностной 110–120-метровой зоне геологического разреза рассматриваемой площади в составе четвертичного водоносного комплекса выделяются:

- надмерзлотные воды сезонно-талого слоя (Q_{IV}) (верховодка);
- надмерзлотный водоносный верхнечетвертичный-современный аллювиальный горизонт (aQ_{III-IV}) (надмерзлотные воды пойменно-руслowych отложений и I надпойменных террас);
- водоносный криогенно-таликовый ермаковский горизонт (lgQ_{IIIer});
- межмерзлотный водоносный криогенно-таликовый казанцевский горизонт (mQ_{IIIkz}).

Обводненность потенциально водоносных (по литологическому признаку) горизонтов зависит исключительно от их мерзлотного состояния [3]. В связи с этим гидрогеологические условия полностью определяются существующей геокриологической обстановкой. В частности, прерывистое распространение многолетнемерзлых пород (ММП) обусловило, как правило, разобщенность (локализацию) водоносных систем не только речных бассейнов, но и отдельных участков внутри них, что исключает приток подземных вод из отдаленных областей и водообмен даже между соседними водоносными системами. Поэтому условия формирования подземных вод для каждой таликовой зоны индивидуальны и зависят от ряда факторов — местоположения и типа таликовой зоны, площади распространения и мощности талых пород, наличия и характера связи как с вышележащими горизонтами, так и с поверхностными водотоками. Распространение водоносных горизонтов показано на рисунке 1.

Традиционная методика проведения поисковых работ включает следующие методы исследований: гидрогеологическое обследование поисковой площади, наземные геофизические исследования, бурение картировочных гидрогеологических скважин с проведением в них геофизических исследований (ГИС) и поисковых скважин с их опробованием, гидрологические исследования, гидрохимическое опробование [4].

В сложных условиях криолитозоны поиск таликовых зон, на наш взгляд, требует применения комплексирования нескольких методов исследований. Отличие предлагаемой методики от традиционной состоит в комплексировании геофизических методов исследований на полевом этапе работ и применении линеаментного анализа совместно с дешифрированием материалов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) на предполевым этапе.



Для выделения перспективных участков поисковых работ впервые нами выполнены работы по ДЗЗ на топооснове и космоснимке. Отличительной особенностью линеаментного анализа является возможность по его результатам выделять геодинамически-напряженные зоны (ДНЗ) по дешифрированию космических снимков. Такие зоны представляют собой участки земной коры, активные на современном этапе неотектонического развития, характеризующиеся пониженной прочностью, повышенной трещиноватостью, проницаемостью и, как следствие, проявлениями разрывной тектоники. Основная гидрогеологическая роль ДНЗ заключается в распределении подземного стока, формировании гидрогеологических и гидрохимических аномалий, специфических гидрогеологических условий [5].

Научно-практический опыт проведения поисков пресных подземных вод в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород показывает, что выявление таликовых зон практически невозможно без опережающего геофизического изучения, обеспечивающего интерпретацию пород разреза. Причем выявление потенциально-перспективных участков производится в первую очередь по признаку «мерзлые — алые», и только потом они дифференцируются по значениям геофизических параметров, характеризующих литологию и водопроницаемость пород.

Для поисков пресных подземных вод на изучаемой площади работ применялось комплексирование двух наземных геофизических методов: зондирование методом переходных процессов (методом зондирования становлением поля в ближайшей зоне) (ЗМПП (ЗСБ)) и ядерно-магнитного резонанса (ЯМР-зондирование).

Предварительно перед наземными геофизическими исследованиями, с целью изучения геоэкологической, гидрологической обстановки на поисковой площади работ, проводилось рекогносцировочное обследование территории. Преследовались такие задачи, как: оценка и изучение ландшафтно-индикационных признаков обнаружения таликовых зон как источников пресного водоснабжения; оценка санитарного состояния территории, возможности проведения наземных геофизических работ и заложения буровых скважин на перспективных участках с возможностью проезда автомобильного транспорта, выявления наличия действующих, либо заброшенных поисково-разведочных скважин, уточнение местоположения линий трубопроводов различного назначения, дорог, свалок и других техногенных объектов.

Электроразведочное зондирование методом переходных процессов

Преимущество применения геофизических электроразведочных исследований методом переходных процессов по сравнению с вертикальным электроразведочным зондированием состоит в отсутствии заземлений, высокой локальности исследований (возможность использования установок, разнос которых значительно меньше глубины зондирования),

а также чувствительности по отношению к проводникам, перекрытым высокоомными экранами.

Электромагнитное зондирование по методике ЗМПП основано на возбуждении в горных породах переменных электромагнитных полей с помощью незаземленной генераторной петли и регистрации процесса становления поля после каждого импульса тока многовитковой приемной антенной. Для этого на местности раскладывается генераторная петля размером 100×100 м, измерения выполняются датчиком ПДИ и приемной 2-х витковой петлей размером $6,25 \times 6,25$ м с предварительным усилителем, $K_{ус} = 100$. Шаг раскладки генераторных петель — 300 м. В наиболее перспективных на поиски воды местах проводились детализационные работы (рис. 3).

Метод ядерно-магнитно-резонансного зондирования (ЯМР)

В связи со сложностью мерзлотно-гидрогеологических условий криолитозоны применяется дополнительный метод геофизических исследований — ядерно-магнитно-резонансное зондирование с целью уточнения интервалов залегания водоносных таликовых зон и определения процентного содержания в них воды в жидкой фазе. Метод выполняется с помощью полевого геофизического прибора, предназначенного для выяснения гидрогеологических и инженерно-геологических условий без бурения скважин гидрогеологического ядерно-магнитно-резонансного томографа «Гидроскоп» [6].

Метод ЯМР-зондирования основан на возбуждении, регистрации и математической обработке сигнала ядерного магнитного резонанса протонов свободной воды в магнитном поле Земли с помощью комплекса «Гидроскоп», предназначенного для поиска подземных вод на глубинах до 120 м без бурения скважин. Прибор позволяет определить мощность наиболее обводненных слоев и глубину их залегания, выбрать наиболее эффективные места для бурения разведочных скважин. Установка «Гидроскоп» регистрирует сигнал ЯМР только от воды в жидком состоянии: связанная вода, лед и мерзлота определяются одинаково как безводные структуры (водоупоры) [7]. Для этого на поверхности земли разворачивается антенна-кабель в форме круга диаметром до 150 м. Время измерения в одной географической точке, с учетом раскладывания и сбора антенны, обычно не превышает 4 часов.

Результаты

По результатам модуля дистанционного зондирования Земли (МДЗЗ) и линеamentного анализа выявлены:

1. Долины водотоков, занятых березово-лиственничными редкостойными лесами, сложенными с поверхности супесчаными отложениями и характеризующимися наиболее высокими среднегодовыми температурами и максимальными глубинами сезонного протаивания.

2. Низинные болота, обводненные травяные, травяно-сфагновые, иногда с группами деревьев и перелесками.

3. Ложбины стока с обводненными травяными и травяно-сфагновыми болотами.

В соответствии с представлениями, изложенными в [8], узлы пересечения ДНЗ характеризуются наибольшей расчлененностью рельефа, повышенной трещиноватостью и в целом повышенной водоносностью.

Анализ материалов ДЗЗ позволил предварительно выделить участки таликовых зон для последующего этапа полевых работ — геофизических исследований (рис. 2).

Результаты геофизических исследований (ЗМПП) подвергались предварительной полевой и камеральной обработке. Послойная интерпретация для горизонтально слоистого разреза выполнялась в программе Podbog-4. Здесь решалась обратная задача по подбору параметров горизонтально-слоистого разреза для каждой точки зондирования. В качестве подбираемой кривой использовались первичные (не сглаженные) данные.



Условные обозначения:

-  — площадь поисков пресных подземных вод;
-  — предполагаемые таликовые зоны;
-  — линеаменты;
-  — динамически напряженные зоны (ДНЗ).

Рис. 2. Карта-схема линеаментов и динамически напряженных зон (ДНЗ) на топографической основе

Результаты исследования отображались в виде послойных геоэлектрических разрезов удельных сопротивлений по 9 профилям зондирования, построенным по результатам расчета трансформант.

Исследования на изучаемой площади показали, что высокие электрические сопротивления (тысячи Ом·м) соответствуют преимущественно песчанистым породам в мерзлом состоянии. Мерзлые супеси и суглинки, в которых незамерзшей воды значительно больше, характеризуются промежуточными значениями удельного электрического сопротивления. Мерзлые супеси или пески «вялой» мерзлоты имеют уровень удельных сопротивлений 400–700 Ом·м, в мерзлых глинах и суглинках сопротивление падает от 300 до 250 Ом·м. Понижение электрического сопротивления до первых сотен Ом·м может быть связано с наличием в составе пород значительного количества глинистого материала либо с участками растепления. Интервалы талых зон характеризуются низкими значениями сопротивлений от 10 до 200 Ом·м. Для этих зон распределение удельных сопротивлений выглядит следующим образом: талые глины (суглинки) выделяются по значениям 10–35 Ом·м, а талые пески от 40 до 200 Ом·м.

В песках диапазон изменений электропроводности связан, в основном, со степенью их глинистости.

Анализ полученных данных профильных геофизических исследований методом ЗММП позволил выявить восемь наиболее перспективных участков для поисков пресных подземных вод на изучаемой площади (рис. 3).

На этих перспективных участках для надежности их выделения проведены ЯМР-зондирования. Зондирования показали, что подземные воды регистрировались во всех 16 точках исследований, при этом в разрезе зафиксированы 2 (3) водоносных интервала, однако процент содержания в них воды в жидкой фазе не превысил 11,5 %.

По результатам математической обработки ЯМР-сигнала было выделено пять наиболее перспективных точек (№№ 1, 8, 12, 13, 15), которые показывают наиболее обводненные зоны в интервалах глубин от 20 до 85 м, с содержанием воды от 4,1 до 10,7 %.

Таким образом, применение комплексирования методов исследований позволило на поисковой площади надежнее выделить перспективные участки для постановки дальнейших буровых работ. Это участки № 2, № 7, № 8 (рис. 3).

Скважины были пробурены роторным способом с прямой промывкой глинистым раствором станком типа УРБ-3А3. Предварительно осуществлялось бурение картировочного ствола, в нем выполнялся комплекс геофизических исследований методами (ГИС): высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования, интегрального гамма-каротажа, термометрии, кавернометрии. По результатам ГИС проводилось разведочное бурение, освоение скважины и ее опробование в случае обнаружения талых водоносных пластов. В противном случае картировочная скважина ликвидировалась.

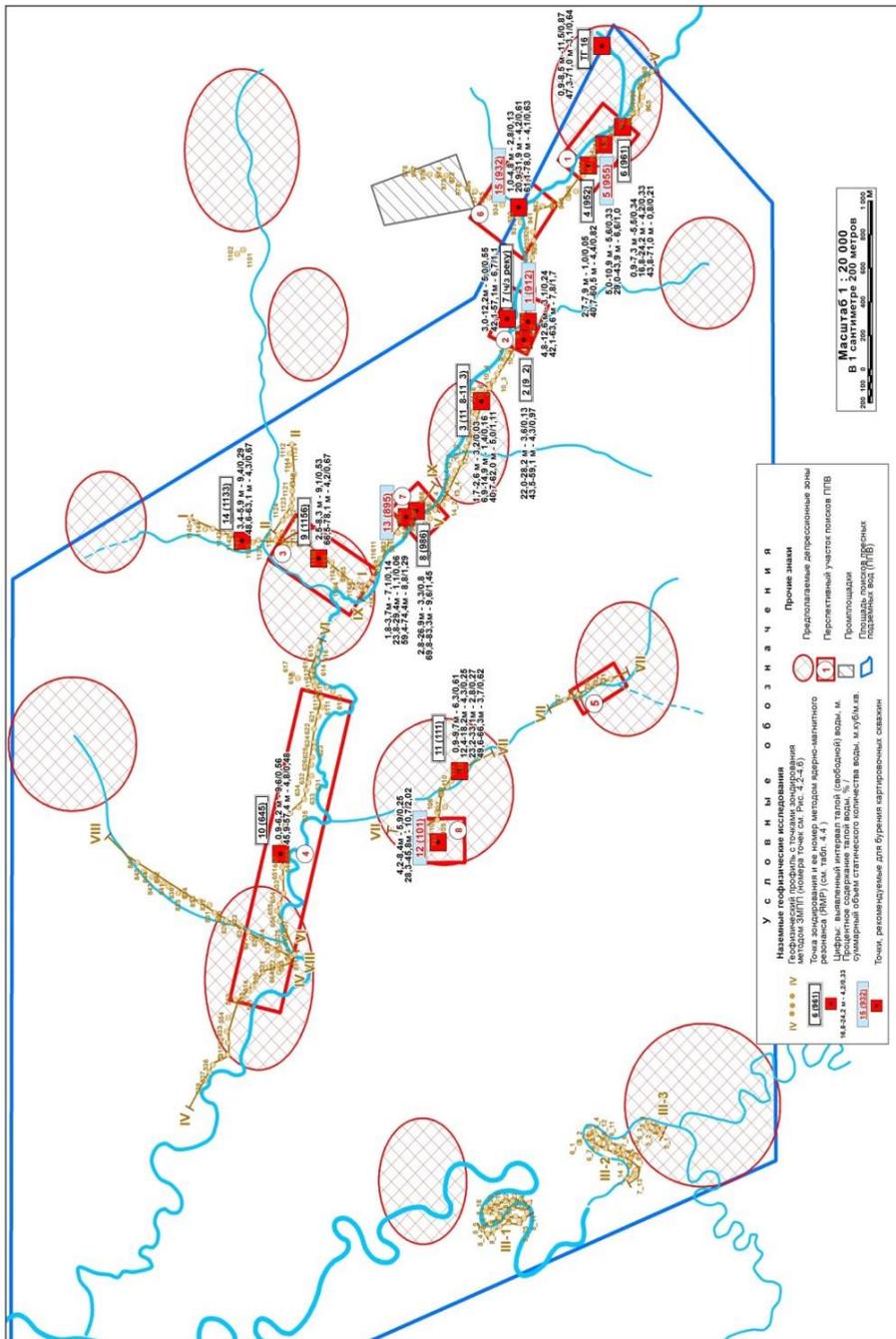


Рис. 3. Карта фактического материала площадки поисков пресных подземных вод

На участках № 2 и № 7 проведенные работы не дали положительных результатов. На участке № 8 в т. 12 (101) в процессе бурения картировочного ствола до глубины 113,5 м и проведения каротажных работ выявлено наличие талых пород четвертичных казанцевских отложений в интервале глубин 28–74,9 м.

С целью определения водообильности вскрытого межмерзлотного криогенно-таликового казанцевского горизонта и качества содержащихся в нем подземных вод в данной точке пробурена разведочная скважина 2Р. В процессе разглинзации и прокачки скважины 2Р эрлифтом в течение 24 часов был достигнут водоприток дебитом 24 м³/сут. После разглинзации в течение 72 часов в скважине проведена пробная откачка с использованием погружного насоса марки БЦП 04-80(м)-0,75(кВт). Дебит скважины составил 69,6 м³/сут при понижении 20 м. В процессе проведения откачки были отобраны пробы воды на полный химический, микробиологический и радиологический анализы.

По результатам исследований составлен геологический отчет с подсчетом запасов пресных подземных вод. Запасы подземных вод утверждены в госгеолэкспертизе (ТКЗ РФ).

Выводы

1. В условиях сплошного распространения многолетнемерзлых пород использование ландшафтно-индикационного анализа в комплексе с дешифрированием материалов ДЗЗ земли и геофизическими методами позволило выявить перспективные участки таликовых зон для успешного проведения поисково-разведочных работ на пресные подземные воды.

2. Применение технологии комплексирования методов исследований при гидрогеологических изысканиях подземных вод в условиях криолитозоны для их использования в целях питьевого и технического водоснабжения населенных пунктов и объектов промышленности позволяет в значительной степени повысить степень надежности выявления обводненных таликовых зон, сократить материальные затраты и продолжительность исследований.

Список источников

1. Курчиков, А. Р. Изучение геотехногенной системы «водоносный пласт — скважина» с использованием прецизионных наблюдений на водозаборах Тюменской области / А. Р. Курчиков, В. И. Козырев. – DOI 10.31660/0445-0108-2020-4-8-20. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 4. – С. 8–20.

2. Матусевич, В. М. Геофлюидальные системы и проблемы нефтегазоносности Западно-Сибирского мегабассейна / В. М. Матусевич, А. В. Рыльков, И. Н. Ушатинский. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2005. – 225 с. – Текст : непосредственный.

3. Романовский, Н. Н. Подземные воды криолитозоны : учебное пособие / Н. Н. Романовский; под ред. проф. В. А. Всеволожского. – Москва : Изд-во МГУ, 1983. – 231 с. – Текст : непосредственный.
4. Гидрогеологические особенности криолитозоны. Опыт изучения таликовых зон в нижнем течении Оби и на полуострове Ямал / Б. В. Боровский, Г. Е. Ершов, С. З. Козак, С. С. Палкин. – Текст : непосредственный // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XIX Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Тюмень, 2009. – С. 162–166.
5. Радченко, А. В. Динамически напряженные зоны литосферы — активные каналы энерго-массопереноса / А. В. Радченко, О. С. Мартынов, В. М. Матусевич. – Т. 1. – Тюмень : Тюменский дом печати, 2009. – 240 с. – Текст : непосредственный.
6. Device for measuring the parameter of underground mineral deposit / A. G. Semenov, M. D. Schirov, A. V. Legchenko [et al.]. – Text : direct // Great Britain, Patent B. – 1989. – Vol. 2198540. – P. 1989.
7. Методика поверхностного ЯМР-Зондирования для поиска и разведки подземных вод / Е. В. Кальнеус, В. С. Кусковский, А. А. Шубин [и др.]. – Текст : непосредственный // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XX Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Иркутск, 2012. – С. 523–526.
8. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии и радарной интерферометрии на геодинамическом полигоне Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения / О. В. Волков, Ю. В. Васильев, Д. П. Иноземцев, В. И. Козырев. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 3(131). – С. 97–103.

References

1. Kurchikov, A. R., & Kozyrev, V. I. (2020). Study of the "aquifer-well" geotechnogenic system using precision observations at the water intakes of Tyumen region. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 8-20. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2020-4-8-20
2. Matusevich, V. M., Ryl'kov, A. V., & Ushatinskiy, I. N. (2005). *Geoflyuidal'nye sistemy i problemy neftegazonosnosti Zapadno-Sibirskogo megabasseyana*. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., 225 p. (In Russian).
3. Romanovskiy, N. N. (1983). *Podzemnye vody kriolitozony*. Moscow, Izd-vo MGU Publ., p. 231. (In Russian).
4. Borevskiy, B. V., Ershov, G. E., Kozak, S. Z., & Palkin, S. S. (2009). *Gidrogeologicheskie osobennosti kriolitozony. Opyt izucheniya talikovykh zon v nizhnem techenii Obi i na poluostrove Yamal*. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XIX Soveshchanie po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka). Tyumen, pp. 162-166. (In Russian).
5. Radchenko, A. V. Martynov, O. S. & Matusevich, V. M. (2009). *Dinamicheski napryazhennye zony litosfery — aktivnye kanaly energo-massopere-nosa*. Tyumen, Tyumenskiy dom pechati Publ., 240 p. (In Russian).

6. Semenov, A. G., Schirov, M. D., Legchenko, A. V., Burshtein, A. I., & Pusep, A. Y. (1989). Device for measuring the parameter of underground mineral deposit. Great Britain, Patent B, 2198540, p. 1989 (In English).

7. Kal'neus, E. V., Kuskovskiy, V. S., Shubin, A. A., Bizin, M. A., & Novoselov, V. B. (2012). Metodika poverkhnostnogo YAMR-Zondirovaniya dlya poiska i razvedki podzemnykh vod. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam Vostoka Rossii (XX Soveshchanie po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka). Irkutsk, pp. 523-526. (In Russian).

8. Volkov, N. V., Vasiliev, Yu. V., Inozemtsev, D. P., Filatov, A. V. & Kozyrev, V. I. (2024). The results of monitoring deformation processes using high-precision geodesy and radar interferometry at the geodynamic polygon of the Polar oil and gas condensate field. Mine surveying and subsurface use, 3(131), pp. 97-103. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Козырев Владимир Иванович,
кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Западно-Сибирский филиал Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, (ЗСФ ИНГГ СО РАН), г. Тюмень, Kozyrev-v@mail.ru

Vladimir I. Kozyrev, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher, West Siberian Division of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Tyumen, kozyrev-v@mail.ru

Васильев Юрий Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук, ст. научный сотрудник, Западно-Сибирский филиал Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, (ЗСФ ИНГГ СО РАН), Тюмень.

Yuri V. Vasiliev, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, West Siberian Division of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Tyumen

Статья поступила в редакцию 23.12.2024; одобрена после рецензирования 09.01.2025; принята к публикации 21.01.2025.

The article was submitted 23.12.2024; approved after reviewing 09.01.2025; accepted for publication 21.01.2025.