

**ПОДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО НАГОРЬЯ****В.Е. Глотов***Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт имени Н.А. Шило ДВО РАН,  
685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия; geocol@neisri.ru*

Цель работы в выявлении условий залегания и формирования подмерзлотных вод в терригенных породах палеозоя, триаса и нижнемеловых гранитоидах Чукотского нагорья. В палеозойских толщах напорные подмерзлотные воды вскрыты на глубинах 223–340 м, удельные дебиты 0.01–0.5 л/(с·м), состав преимущественно хлоридный, минерализация 0.2–1.3 г/дм<sup>3</sup>. В триасовых породах на глубинах 100–300 м уровень выше устьев скважин от 3–4 до 58.4 м, удельные дебиты 0.00001 до 0.25 л/(с·м); воды хлоридные, гидрокарбонатные и сульфатные, минерализация 0.1–3.1 г/дм<sup>3</sup>. В гранитоидных массивах мощность многолетнемерзлых пород на берегу моря около 100 м, на водоразделах около 450 м, удельные дебиты скважин 0.0001–0.013 л/(с·м). Полученные данные, подтвержденные магнитотеллурическим зондированием, указывают на формирование в нагорье гидрогеологических массивов, сложенных магматическими и метаморфизованными породами. В терригенных триасовых толщах образовались структуры с квази-пластовыми трещинными емкостями, связанными с надрывами и разломами. Сместители в них водоупорные, разделяют квазипласты на секции, гидравлически слабо взаимосвязанные. По этой причине в триасовых подмерзлотных слоях господствует застойный или весьма затрудненный водообмен, сохраняющийся более 400 тысяч лет, в гидрогеологических массивах водообмен более активен.

**Ключевые слова:** Чукотское нагорье, многолетнемерзлые породы, подмерзлотные воды, активный и весьма затрудненный водообмен, криогенный напор, магнитотеллурическое зондирование.

**SUBPERMAFROST WATERS IN THE EAST CHUKOTKA'S UPLAND****V.E. Glotov***Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS,  
Portovaya str. 16, Magadan, 685000, Russia; geocol@neisri.ru*

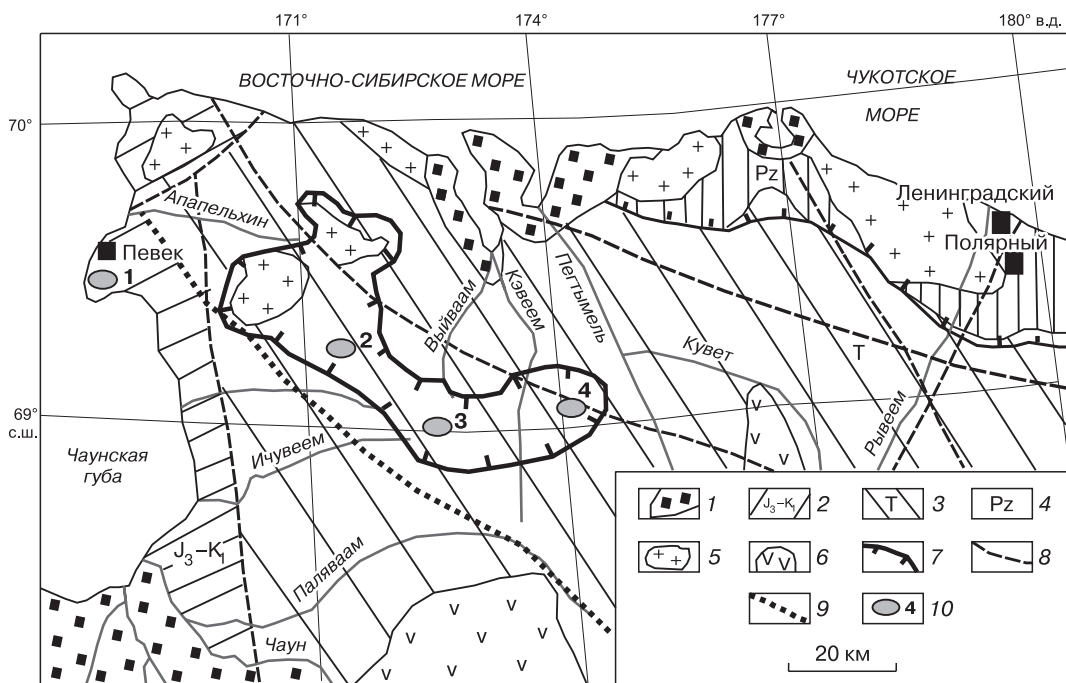
The purpose of the article is to reveal the conditions of occurrence and formation of subpermafrost waters, which have been exposed by wells in the Paleozoic, Triassic terrigenous rocks and the Lower Cretaceous granitoids of the Chukotka Upland. In the Paleozoic strata, the confined subpermafrost waters were exposed at depths from 223 to 340 m. The specific yield of wells varies from 0.01 to 0.5 L/(s·m), the composition is predominantly chloride, mineralization ranges from 0.2 to 1.3 g/dm<sup>3</sup>. In the Triassic rocks at depths from 100 to 300 m, the piezometric surface of waters is higher than the wellhead levels by 3–4 m and up to 58.4 m. The specific yield of wells varies from 0.00001 to 0.25 L/(s·m). The waters are chloride, hydrocarbonate and sulphate, salinity ranges from 0.1 to 3.1 g/dm<sup>3</sup>. In granitoid massifs, the thickness of permafrost near the sea coast is about 100 m; on the watersheds, it is about 450 m. The specific yield of wells varies from 0.0001 to 0.013 L/(s·m). The obtained data, confirmed by the magnetotelluric sounding, indicate the development of hydrogeological massifs composed of igneous and metamorphosed rocks in the upland. Structures with quasi-stratum fracture reservoirs, associated with overthrusts and faults, were formed in the terrigenous Triassic strata. The impermeable fault planes divide the quasi-strata into sections, which are poorly interconnected hydraulically. For this reason, in the Triassic subpermafrost strata, the stagnant or extremely impeded water exchange predominates persisting for more than 400 thousand years; in the hydrogeological massifs, the water exchange is more active.

**Key words:** Chukotka Upland, permafrost zone, subpermafrost waters, active and extremely impeded water exchange, cryogenic pressure, magnetotelluric sounding.

**ВВЕДЕНИЕ**

Чукотское нагорье находится севернее Полярного круга и меридианом 180° делится на части: восточную, дренируемую реками Восточно-Сибирского моря, и западную, дренируемую реками Чукотского моря (рис. 1). В восточной части в годы Великой Отечественной войны стратегическую значимость приобрело Валькумейское оловорудное месторождение, расположенное вблизи морского порта Певек. В последующие годы здесь выявлены месторождения рудного олова (Перво-

начальное) и золота (Майское), россыпи золота в бассейнах рек Ичувеем, Пегтымель и др. При поисках, разведке и отработке месторождений были получены гидрогеологические материалы, которые частично обобщены в работах [Гидрогеология СССР, 1972; Ефимова и др., 1977; Афанасенко и др., 1989]. В этих и последующих публикациях основное внимание уделялось подземным водам надмерзлотных и сквозных таликов как основным источникам пресной воды [Шумихина, 1999; Глотов,



**Рис. 1. Географо-геологическая схема Чукотского террейна – фрагмента пассивной континентальной окраины (восток Чукотского нагорья) [Журавлев, Калинин, 1999].**

1 – кайнозойские отложения современных впадин; 2 – верхнеюрско-нижнемеловые отложения Анюйского субтеррейна; 3, 4 – отложения Чаунского субтеррейна (3 – триасовые, 4 – палеозойские); 5 – гранитоидные нижнемеловые массивы; 6 – вулканогенные покровы мелового возраста; 7 – границы сводовых поднятий; 8 – глубинные разломы; 9 – геофизический профиль 2-DB-V-A; 10 – участки гидрогеологических работ (1, 2 – оловорудные месторождения Валькумейское (1) и Первоначальное (2); 3 – Ичувеевский район месторождений россыпного золота; 4 – Майское золоторудное месторождение).

Глотова, 2015; Глотов, 2020]. Главный недостаток этих трудов – не раскрыты особенности распространения, залегания и формирования подмерзлотных вод. Устранение этого недостатка является целью настоящего исследования.

Научная и практическая актуальность статьи определяется важной ролью гидрогеологических особенностей подмерзлотных слоев в обеспечении устойчивости подземных инженерных сооружений, в оценке перспектив использования этих слоев в качестве хранилищ пресных вод и других жидкостей, в решении ряда геоэкологических и геофизических проблем.

**Методы исследования и материалы.** Использован метод анализа и синтеза рукописных геологических отчетов и опубликованных трудов, в том числе авторских. Фактический материал был получен при бурении и гидрогеологических опробованиях скважин, проходке горных выработок. Впервые в этом районе для получения геокриологических и гидрогеологических сведений были использованы результаты глубинных магнитотеллурических зондирований по опорному профилю 2-DV-A.

**Объект исследования** – основные природные факторы формирования и распространения под-

земных вод восточной части Чукотского нагорья. Западная часть отличается тектоникой и геологической историей в среднеплейстоцен-голоценовое время, поэтому современные мерзлотно-гидрогеологические характеристики этих районов имеют особенности, которые в данной работе не рассматриваются.

**Предмет исследования** – подмерзлотные воды преимущественно в терригенных осадочных породах палеозойско-раннемезозойского возраста и в нижнемеловых интрузивных массивах. Подземные воды вулканогенных покровов (сезонноталого слоя, надмерзлотных и сквозных таликов) требуют отдельного исследования и частично рассмотрены ранее [Глотов, Глотова, 2013; Глотов, 2020].

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные природные факторы, определяющие особенности гидрогеологических условий, – это рельеф, реки, климат, геологическое строение, характер криолитозоны [Пиннекер, 1977].

**Рельеф** востока Чукотского нагорья отличается сглаженными водоразделами с абсолютными отметками 500–800 м. Выделяются горные хребты

и кряжи, сложенные магматогенными породами, резко расчлененные, с абсолютными высотами вершин до 1500 м, отдельные вершины до 1837 м. Повсеместно развиты следы средне- и позднео-плейстоценовых горно-долинных оледенений [Глушкова, Смирнов, 2020].

*Реки* – горные, наиболее крупные по водосбору, Паляваам и Пегтымель (до 17 тыс. км<sup>2</sup>). Открытый сток существует в период с конца мая до начала ноября, в малых водотоках – до конца сентября. В зимнее время в руслах образуются наледи [Толстихин, 1974; Алексеев и др., 2011].

*Климат* характеризуется среднегодовой температурой воздуха около –10 °С, длительностью теплого периода года не более 100–110 дней, средним многолетним количеством осадков 220–260 мм. Около 60 % осадков выпадает в виде дождей [Беликович и др., 1997].

В геологическом отношении восточная часть Чукотского нагорья полностью принадлежит Чаунскому субтеррейну, входящему в состав более крупного Чукотского террейна\* – фрагмента позднепалеозойской–раннемеловой пассивной континентальной окраины [Бялбжеский и др., 2006]. В строении субтеррейна принимают участие регионально-метаморфизованные кембрийские(?) хлоритовые сланцы и девонские песчаники, сланцы и известняки; нижне- и среднекаменноугольные песчаники с карбонатным цементом и конгломераты; верхнекаменноугольные–пермские углистые сланцы и песчаники, слагающие Велиткеный купол на побережье Восточно-Сибирского моря. Повсеместно распространены нижнесреднетриасовые граувакки и глинистые сланцы; верхнетриасовые песчаники, алевролиты, глинистые сланцы. Формирование этих отложе-

ний происходило на континентальном шельфе. В нижнемеловое время они были прорваны гранитоидными интрузиями [Ползунов, 2018].

Характерной особенностью Чаунского субтеррейна является развитие сводово-надвиговых структур (поднятий), осложняющих складчатое залегание триасовых толщ. Наиболее крупная из этих структур – Ичувеевская, длиной до 100 км и шириной до 30 км. Углы падения пород на крыльях структур от 10 до 50°, широко развиты надвиги амплитудой до первых километров, разломы – сбросы, сдвиги [Журавлев, Калинин, 1999]. В пределах таких напряженных участков располагаются рудные месторождения [Волков и др., 2006].

В геокриологическом отношении изучаемый район относится к области сплошной криолитозоны, рассматриваемой как криогенный водоупор (КВ) [Фотиев, 2013]. Мощность толщи многолетнемерзлых пород (ТМП) на вершинах водоразделов достигает 450 м (Валькумейский гранитоидный массив), в речных долинах до 340 м. Температура ТМП на водоразделах на глубине годовых теплооборотов (15–20 м) от –9 до –11 °С [Афанасенко и др., 1989], в речных долинах от –4.5 до –6.0 °С [Ефимова и др., 1977].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Согласно структурно-стратиграфическому принципу выделения гидрогеологических таксонов [Основные положения..., 2001], рассматриваются ярусы, сложенные палеозойскими регионально-метаморфизованными и триасовыми осадочными породами, получившие наибольшее развитие на востоке нагорья, и группа гранитоидных интрузий нижнемелового возраста.

Таблица 1. Показатели водоносности палеозойских отложений

Территория	Глубина скважин, м	Мощность криогенного водоупора, м	Удельный дебит скважин, л/(с·м)	Минерализация воды, г/дм <sup>3</sup>	Содержание ионов, мг/дм <sup>3</sup>
Морское побережье (удаление скважин от моря 3–5 км); абс. отметки устьев скважин 10–20 м; долина р. Рывеем	$\frac{293-390}{330}$	$\frac{223-335}{228}$	$\frac{0.12-0.49}{0.25}$	М $\frac{0.6-1.1}{0.9}$	Cl $\frac{189-197}{215}$ HCO <sub>3</sub> $\frac{102-464}{305}$
Прибрежно-морская зона (удаление от моря 20–25 км); абс. отметки 20–55.9 м; долины р. Пильхинкууль и ее притоков	$\frac{330-410}{362.6}$	$\frac{275-340}{301}$	$\frac{0.01-0.3}{0.13}$	М $\frac{0.2-1.3}{0.73}$	Cl $\frac{51-117}{72}$ HCO <sub>3</sub> $\frac{97-445}{251}$ SO <sub>4</sub> $\frac{35-715}{331}$

Примечание. Здесь и далее: числитель – от наименьших до наибольших значений, знаменатель – среднеарифметическое.

\* Террейн – ограниченный разломами блок земной коры региональных размеров [Бялбжеский и др., 2006].

Обводнение пород всех ярусов связано с развитием зон наложенной трещиноватости различного происхождения.

### Ярус палеозойских пород

Подмерзлотные воды яруса палеозойских пород изучены в прибрежно-морском поясе при поисках источников водоснабжения поселков Ленинградский и Полярный. Гидрогеологические показатели приведены в табл. 1.

Подмерзлотные воды в верхнепалеозойских породах в долине р. Рывеем напорные, самоизлив до 0.8 л/с, удельный дебит  $g = 0.12-0.40$  л/(с·м), коэффициент водопроницаемости пород  $k_p = 4-12$  м<sup>2</sup>/сут.

В 20–25 км южнее морского побережья в долине р. Пильхинкууль при откачке с понижением 32 м получены значения: 1.35 л/с,  $g = 0.042$  л/(с·м). В створе с этой скважиной в речной долине, по данным бурения в ноябре 1971 г., подошва КВ вскрыта на глубине 320 м. Водоносный интервал 40 м. Подмерзлотные воды напорные. Статический уровень выше дневной поверхности на 58.4 м, дебит самоизлива при максимальном напоре равен 1.17 л/с,  $g = 0.02$  л/(с·м),  $k_p = 1$  м<sup>2</sup>/сут.

По преобладающему аниону подмерзлотные воды относятся к гидрокарбонатному, сульфатному и хлоридному классам, по общей минерализации – от пресных (0.2–0.8 г/дм<sup>3</sup>) до слабосоленых (1.3 г/дм<sup>3</sup>).

Воды хлоридного класса распространены в нижнем течении р. Рывеем. Общая минерализа-

ция их от 0.6 до 1.1 г/дм<sup>3</sup> при содержании хлорид-иона 189–497 г/дм<sup>3</sup>.

Воды гидрокарбонатного класса пресные, распространены как на приморском участке, так и на внутриконтинентальном. Содержание гидрокарбонат-иона достигает 445 г/дм<sup>3</sup> при слабощелочной реакции. Распространение этих вод контролируется наличием в разрезе водоносных пород черных глинистых сланцев, насыщенных органическим веществом.

Воды сульфатного класса встречаются в районе пос. Полярный. Минерализация их 0.6–0.8 г/дм<sup>3</sup>, содержание сульфат-иона достигает 280 мг/дм<sup>3</sup>. Среди катионов преобладает магний, что свидетельствует о возможной рудной минерализации, связанной с дайками базальтов или андезитов.

В заключение отметим, что среднеарифметические показатели водоносности палеозойских пород свидетельствуют об их относительно высоких фильтрационных свойствах по всем вскрытым интервалам, что связано с развитием регионально-метаморфизованных толщ осадочных пород с известняками и песчаниками с известковистым цементом в купольной структуре, для которой надвиги не характерны. В этих условиях преобладает обводнение по зонам разломов, в которых наблюдаются следы выщелачивания карбонатов.

### Ярус триасовых отложений

Данные о подмерзлотных водах этого яруса получены при поисках пресных подземных вод для водоснабжения в речных долинах и при раз-

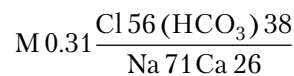
Таблица 2. Показатели водоносности пород в пределах сводово-надвигового поднятия

Месторождение	Глубина скважин, м	Мощность ТМП, м	Удельный дебит скважин, л/(с·м)	Минерализация воды, г/дм <sup>3</sup>	Содержание ионов, мг/дм <sup>3</sup>
Первоначальное месторождение; абс. отметки устьев скважин 152–301 м; 45 скважин	$\frac{134.9-453.5}{235.5}$	$\frac{127-218}{149.3}$	$\frac{0.0001-0.25}{0.04}$	М $\frac{0.11-1.6}{0.42}$	Cl $\frac{10.6-258.4}{51.7}$ HCO <sub>3</sub> $\frac{47-1171}{116}$ SO <sub>4</sub> $\frac{12-1085}{108.6}$
Ичуевские россыпи; абс. отметки устьев скважин 90–240 м; 26 скважин	$\frac{210-400}{286}$	$\frac{100-238}{159}$	$\frac{0.00003-0.2}{0.034}$	М $\frac{0.6-1.28}{0.84}$	Cl $\frac{14.2-250}{53.5}$ HCO <sub>3</sub> $\frac{134-793}{384.5}$ SO <sub>4</sub> $\frac{4-730}{271}$
Майское месторождение; абс. отметки устьев скважин 208.7–297.4 м; 18 скважин	$\frac{210-302}{222}$	$\frac{210-260}{235.6}$	$\frac{0.000008-0.026}{0.005}$	М $\frac{0.31-0.98}{0.7}$	Cl $\frac{21.3-184}{78}$ HCO <sub>3</sub> $\frac{171-756}{421}$ SO <sub>4</sub> $\frac{0-375}{79.8}$

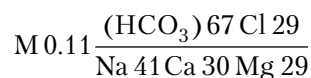
ведке месторождений: Первоначального оловянного, Майского золоторудного, Ичувеемского узла россыпей золота. Участки всех месторождений связаны с Ичувеемским сводово-надвиговым поднятием, протянувшимся от р. Пыркакайваам до долины р. Кэвеем. Для изучения условий обработки месторождений гидрогеологические скважины бурились на всех элементах рельефа. Ниже представлены результаты выполненных работ.

**Результаты работ в пределах сводово-надвигового поднятия.** В обобщенной форме основные гидрогеологические показатели приведены в табл. 2. Все участки находятся в сглаженном низкогорье в бассейнах водотоков четвертого и более низких порядков, в геологически сходных условиях. Выявлено, что мощность КВ, гидродинамические и гидрогеохимические показатели в соседних блоках сходны на разных элементах рельефа. Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим данные по участкам месторождения Первоначальное. На участке в верхнем течении р. Пыркакайваам в январе–мае 1978 г. на площади пересечения руслом реки зоны надвига пробурены две скважины глубиной по 250 м (рис. 2, А). Висячем блоке надвига, сложенном среднетриасовыми полимиктовыми песчаниками, мощность КВ составляет 201 м, т. е. почти на 46 м больше, чем в лежащем блоке (см. рис. 2, Б).

Водонепроницаемая зона надвига (шарьирования) мощностью до 5 м сложена раздробленными вмещающими породами, сцементированными милонитизированным материалом. Наличие тектонической водоупорной завесы объясняет различия в мощностях КВ, гидродинамических показателях и химическом составе воды. В лежащем блоке ее состав выражается формулой



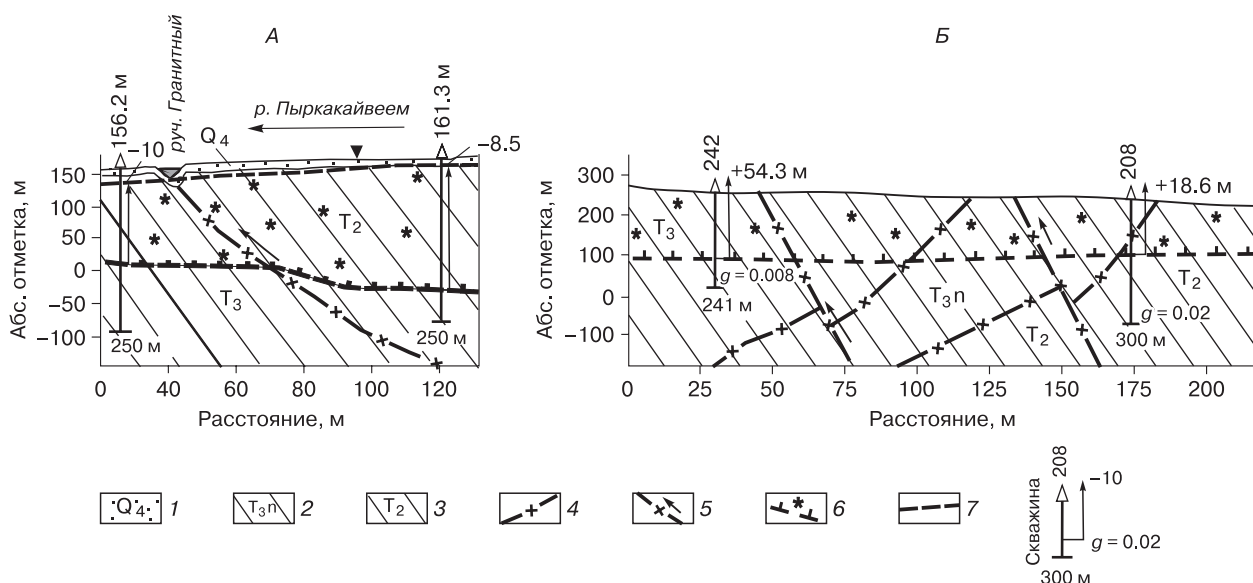
при содержании хлор-иона 112.5 мг/дм<sup>3</sup>; висячем – формулой



при содержании хлор-иона 21.3 мг/дм<sup>3</sup>.

По результатам пробных откачек в висячем блоке  $g = 0.003$  л/(с·м),  $k_p = 0.09$  м<sup>2</sup>/сут, в лежащем блоке  $g = 0.004$  л/(с·м),  $k_p = 0.12$  м<sup>2</sup>/сут. Соответствие уклона пьезометрической поверхности уклону речного русла указывает на наличие, хотя и затрудненной, гидродинамической связи.

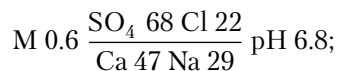
На рис. 2, Б приведены данные по двум скважинам, пробуренным на водоразделе руч. Олений и р. Пыркакайваам (штокверк Крутой). Скважина с абсолютной отметкой устья 208 м вскрыла подошву КВ на глубине 218 м. Залегающие под этой



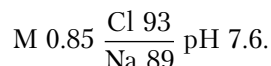
**Рис. 2.** Схематические гидрогеологические разрезы вдоль долины р. Пыркакайваам в районе руч. Гранитный (А) и по водоразделу руч. Олений – р. Пыркакайваам (Б).

1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – верхний триас, норийский ярус, переслаивание глинистых сланцев, алевролитов и мелкозернистых песчаников; 3 – среднетриасовые отложения, песчаники и алевролиты; 4 – надвиги, в плоскости надвига гидротермально преобразованные милониты; 5 – сбросы, в плоскости сброса катаклазиты; 6 – граница многолетнемерзлых пород, бергштрихи обращены в сторону ММП; 7 – уровень подмерзлотных вод в речной долине. Скважина: цифры внизу – глубина скважины, м; цифры вверху – абс. отметка устья, м;  $g$  – удельный дебит, л/(с·м); стрелка – высота подъема подмерзлотных вод, м; плюс – над устьем, минус – ниже устья.

подошвой напорные подземные воды имели высоту подъема воды над дневной поверхностью 18.6 м,  $g = 0.02$  л/(с·м). Формула состава воды:



$Fe^{2+} - 4.5$  мг/дм<sup>3</sup>. Скважина на водоразделе (выше на 34 м) прошла в ТМП 162 м, высота подъема воды над устьем скважины 54.3 м,  $g = 0.008$  л/(с·м). Формула состава воды:



По геологическим данным, между этими скважинами расположены сбросы, сместители которых с мощностью 0.5 м выполнены тектонической милонитизированной брекчией. Такие сместители обеспечивают гидрогеологические различия пространственно близких блоков и ограничивают их водные ресурсы, что отмечали все гидрогеологи, изучавшие гидрогеологические условия отработки рудных месторождений в Чукотском нагорье.

Таким образом, бурение скважин на различных участках сводово-надвиговой структуры показало, что трещиноватые водоносные триасовые отложения распространены повсеместно. Однако их водоносность фрагментарная, низкая и неравномерная по площади. Контакты фрагментов тектонические (катаклазированные или милонитизированные сместители) или гидротермальные (жилы кварца, каолинита). Небольшие значения коэффициента водопроницаемости (менее 0.01 м<sup>2</sup>/сут) не грозят большими притоками воды в выработки при отработке месторождений, но присутствие воды в трещинах делает неустойчивыми стенки всех подземных выработок. Поэтому при освоении подмерзлотных рудных зон Майско-

го золоторудного месторождения на всех подземных выработках требуется сплошное крепление, хотя водоприитоки крайне малы и характеризуются как капез.

**Результаты работ по изучению подмерзлотных вод в речных долинах.** В условиях сплошного КВ для решения задачи водоснабжения наиболее перспективны речные долины. В горных районах они обычно приурочены к зонам разломов, в том числе к сместителям надвигов, сдвигов, сбросов. Обобщение имеющегося материала показывает, что сквозные талики в речных долинах в восточной части Чукотского нагорья встречаются редко и связаны с грабен-долинами, выполненными рыхлыми ледниковыми или аллювиальными отложениями мощностью более 10–15 м [Глотов, 2020]. Такие участки выявлены только в бассейне р. Пегтымель. Поэтому в табл. 3 приведены обобщенные результаты бурения и опробования скважин на участках вне зон сквозных таликов.

Заметны различия в гидрогеологических показателях приморского участка, который в геологическом отношении находится на восточном крыле Анюйского субтеррейна. Внутриконтинентальная площадь принадлежит Чаунскому субтеррейну (см. табл. 3).

В целом общая минерализация и содержание хлор-иона на приморских участках выше, чем на внутриконтинентальных, но водопроницаемость пород на первом в 2.2 раза меньше, чем на втором.

Следует отметить, что подмерзлотные воды по своему составу относятся к гидрокарбонатному, хлоридному и сульфатному классам, свойственным подмерзлотным водам палеозойских образований и триасовых отложений в сводово-надвиговых поднятиях.

Таблица 3. Показатели водоносности триасовых пород в речных долинах

Участки	Глубина скважин, м	Мощность ТМП, м	Удельный дебит скважин, л/(с·м)	Минерализация воды, г/дм <sup>3</sup>	Содержание ионов, мг/дм <sup>3</sup>
Приморские участки; абс. отметки 5–80 м; удаленность от побережья Чаунской губы до 9 км; 20 скважин	$\frac{300-602}{386}$	$\frac{140-250}{175}$	$\frac{0.0007-0.09}{0.02}$	$M \frac{0.19-3.1}{1.73}$	$Cl \frac{2.56-445}{80.6}$ $HCO_3 \frac{78-507.5}{180.4}$ $SO_4 \frac{0.1-60}{31.4}$
Внутриконтинентальные участки; абс. отметки 156–302 м; 11 скважин	$\frac{201-300}{286}$	$\frac{120-240}{191.5}$	$\frac{0.0005-0.28}{0.04}$	$M \frac{0.13-2.6}{0.66}$	$Cl \frac{2.3-445}{80.6}$ $HCO_3 \frac{97.6-829.5}{294}$ $SO_4 \frac{0.6-44.5}{23}$

**Группа интрузивных массивов**

Гидрогеологические характеристики данной группы получены только при отработке Валькумейского оловорудного месторождения, приуроченного к одноименному гранитоидному массиву. В рельефе этот массив представлен низкой сглаженной горой Певек с абсолютной отметкой 616 м. При проходке подземных горных выработок на отметках от +150 до –250 м установлено, что КВ имеет сплошной характер, в прибрежно-морской полосе его мощность около 100 м. Предполагаемая мощность КВ в верхней части склона (на вершине горы) около 400–450 м.

Вскрытые выработками подмерзлотные воды залегают в субмеридиональных зонах разломов, вмещающих и рудные тела. Напор воды на прибрежно-морском участке не превышает 10 м над устьем. Возможно, под водоразделом подмерзлотные воды не контактируют с КВ и их уровни свободные.

Многолетние наблюдения за притоками воды в подземные выработки показывают, что все водоносные разломы гидродинамически слабо взаимосвязаны. После вскрытия водоносной зоны водопритокки меняются от первых единиц до 30 м<sup>3</sup>/сут, через 10–15 сут приток снижается в 2–3 раза, через 2–3 недели (иногда до 5–6 месяцев) – до осушения. О водоносности зон разломов до их вскрытия можно судить по данным откачек из опережающих скважин, пробуренных с подошвы выработок на разных горизонтах (табл. 4).

Обратим внимание на существование в рудных зонах относительно водообильных объектов (“карманов”). По замечанию главного геолога рудника А.Д. Харюткина, подобные “карманы” отличаются насыщенностью трещиноватой зоны прожилками кальцита.

По составу подмерзлотные воды хлоридные натриево-кальциевые или кальциево-натриевые. По величине общей минерализации: пресные – до 1 г/дм<sup>3</sup>, солоноватые – 1–20, соленые – 20–40, рассолы – более 40 г/дм<sup>3</sup> [Глотов, Глотова, 2003].

Пресные воды вскрыты выработками, удаленными от Чаунской губы на 0.5 км и более. Они залегают ниже подошвы КВ линзообразными скоплениями в разломах, формируя зону пресных вод, подстилаемых солоноватыми.

Соленые воды и рассолы залегают под дном Чаунской губы. Рассолы с минерализацией до 300–320 г/дм<sup>3</sup> образуют изолированные скопления. Одно из них с составом воды

$$M 314 \frac{Cl 100}{Mg 73 Na 26} pH 6.8$$

вскрыто 19.03.1970 г. при отработке рудной жилы на участке Прибрежный. Наличие их свидетельствует о происходящих процессах криогенной метаморфизации при температуре от –10 до –15 °С [Абрамов, 2014]. Не исключено, что криопэги образовались вблизи дневной поверхности, затем проникли на более глубокие горизонты.

Изучение содержания трития в пробах, отобранных 18.07.1974 г. Д.В. Ефимовой из самоизливающихся скважин на горизонте –100 м [Ефимова и др., 1978], показало, что в соленой воде, состав которой выражается формулой

$$M 37.9 \frac{Cl 98}{Ca 70 (Na + K) 22},$$

содержится 83 ТЕ, или 9.9 Бк/л, в воде Чаунской губы 13.4 Бк/л. Эти значения соответствуют естественным величинам трития в природных водах зоны активного водообмена. Однако подмерзлотные воды, вскрытые в Валькумейском массиве при сплошном характере КВ, распространены в зоне затрудненного водообмена, о чем свидетельствует и наличие ионов двухвалентного железа в сульфатном рассоле. Не исключено, что содержащий тритий воздух рудничной атмосферы проникает в осушенные зоны разломов, при конденсации атмосферной влаги образуются тритиеносные водные скопления, разбавляющие солоноватые воды. Образование трития могло происходить и при естественных распадах радиоактивных компонентов.

Завершая описание гидрогеологической характеристики ярусов палеозойских и триасовых отложений и группы интрузивных пород, обратим внимание на некоторые общие для Чукотского нагорья особенности.

1. Подмерзлотные воды в осадочных породах триаса повсеместно напорные, в том числе на водоразделах выше возможных очагов питания подземных вод. В группе интрузивных массивов на

Таблица 4. Результаты откачек из скважин в подземных выработках [Глотов, Глотова, 2003]

№ п/п	Абс. отметка, м	Абс. отметка глубины вскрытия водоносных зон, м	Результаты откачки		
			Постоянный дебит в первые 5 суток, л/с	Понижение от статического уровня, м	Удельный дебит, л/(с·м)
1	+10	–167	0.02	48.5	0.0004
2	+10	–90	0.35	90.0	0.0040
3	–50	–75	0.75	60.0	0.0130
4	–100	–130	0.015	110.0	0.0001
5	–100	–180	1.00	110.0	0.0090

приводораздельных площадях подмерзлотные воды, возможно, имеют свободный уровень.

2. Водопроницаемость ниже подошвы КВ в палеозойских регионально-метаморфизованных образованиях, изученная в речных долинах, в десятки раз превышает аналогичный показатель в триасовых отложениях и интрузивных массивах.

3. По химическому составу наибольшим распространением пользуются воды гидрокарбонатного, в прибрежно-морской низменной полосе – хлоридного, в зонах гидротермальной сульфидной минерализации – сульфатного классов. По общей минерализации преобладают воды слабосоленые и пресные. Но в водах любого класса обоих гидрогеологических ярусов возможно высокое содержание бикарбоната.

### ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЮГА ЧУКОТСКОГО НАГОРЬЯ ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) выполнено специалистами ВСЕГЕИ в 2002–2004 гг. по профилю 2-DV-A от горы Певек до рудника Валунистое. На рис. 3 представлен фрагмент профиля, глубина которого ограничена 3000 м, поскольку она близка к общей мощности триасовых отложений на данном участке работ. Профиль проходит вдоль юго-западного крыла Ичувеевского сводово-надвигового поднятия к верховьям р. Паляваам. На расстоянии примерно 12–15 км от горы Певек геоэлектрический разрез пересекает осадочно-вулканогенную толщу верхнеюрско-нижнемелового возраста, участвующую в сложении Анюйского субтеррейна, далее до 40 км – зону Певекского субмеридионального глубинного разлома, разделяющего Анюйский и Чаунский субтеррейны.

До 150 км разрез профиля представлен триасовыми осадочными породами, которые на глубине более 3000 м подстилаются осадочными палеозойскими отложениями. Осадочные отложения прорваны дайками и массивами магматических пород, разбиты многочисленными разломами, надвигами. В полном виде геоэлектрические разрезы представлены в электронных информационных ресурсах ВСЕГЕИ по адресу: Разрез-2-DV-A\_Geoelec\_raz\_0-225km.jpg (vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/chukotsky\_ao/index.php).

Используя результаты работ по методу МТЗ в геолого-геокриологически сходных районах Северо-Востока России [Хасанов, Шарафутдинов, 2011], на изучаемом геоэлектрическом разрезе автором выделены блоки монолитных магматических и метаморфизованных пород с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) более 398 Ом·м. Водоносность их проявлена в виде узких субвертикальных полос с УЭС, равным 25.1–39.8 Ом·м. По условиям залегания подземных вод такие блоки являются типичными гидрогеологическими массивами.

Высокоомной является и приповерхностная непрерывная полоса, в определенной степени повторяющая рельеф дневной поверхности. Мощность ее изменяется от 200 до 400 м. В составе полосы выделяются два пояса примерно равной мощности: верхний с УЭС от 158 до 251 Ом·м и нижний с УЭС от 252 до 398 Ом·м. Автор считает непрерывную полосу толщей многолетнемерзлых пород, в составе которой верхний пояс – льдистый слой регионально трещиноватых пород, нижний – мерзлые породы, залегающие глубже зоны гипергенной трещиноватости.

Криогенный водоупор залегает на подмерзлотных относительно низкоомных осадочных образованиях триаса, УЭС которых изменяется от менее 25.1 до 158 Ом·м. Величина УЭС в данном

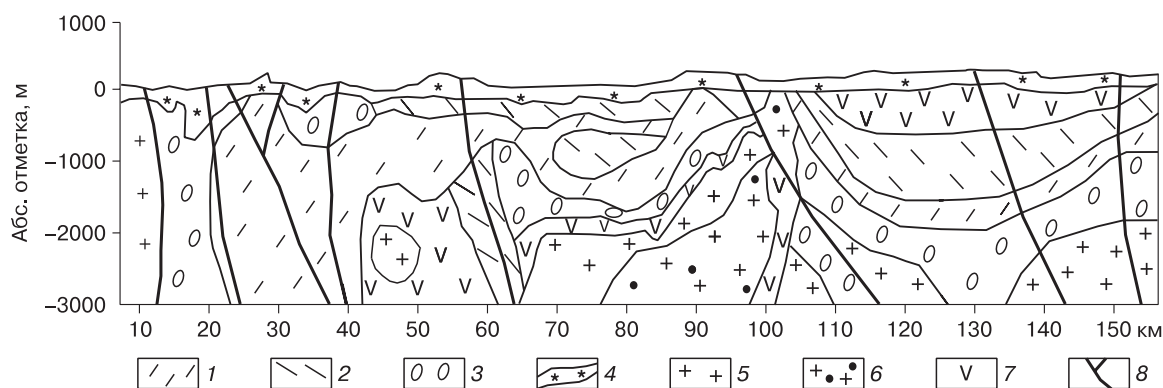


Рис. 3. Геоэлектрический разрез южной окраины Чукотского нагорья на участке 10–150 км от г. Певек.

По увеличенному фрагменту геоэлектрического и сейсмического профиля 2-DV-A (vsegei.ru/ru/info.../2021). Удельные электрические сопротивления зон (Ом·м): 1 – менее 25.1; 2 – 25.1–32.8; 3 – 32.8–158; 4 – 158–358; 5 – 358–1000; 6 – 1000–10 000; 7 – более 10 000; 8 – разлом.



случае отражает водопроницаемость пород или удельные дебиты скважин и минерализацию подземных вод, определяемые при откачках. Например, в интервале профиля 102–105 км в долине р. Средний Инчоун ТМП залегает на слое с УЭС менее 25.1 Ом·м. Ранее здесь была пробурена скважина глубиной 302 м. Напорные подмерзлотные воды вскрыты на глубине 217 м, уровень воды поднялся выше устья на 34.6 м. При откачке 26.06.1991 г. получен постоянный дебит 12.5 л/с при понижении 67.4 м,  $g = 0.19$  л/(с·м),  $k_p = 20$  м<sup>2</sup>/сут. Формула состава воды:

$$M 0.82 \frac{(HCO_3) 79 Cl 21}{Na 72 Mg 19} pH 6.3.$$

Содержание гидрокарбонат-иона равно 756 мг/дм<sup>3</sup>. Данные этой скважины отражают гидрогеологические особенности залегания наиболее низкоомной зоны. Подмерзлотные пласты прослеживаются по всему профилю примерно до 150 км, что связано с широким развитием надвигов. Следовательно, результаты МТЗ достаточно наглядно отражают общие гидрогеологические и геокриологические особенности изучаемых блоков земной коры.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ

На основе данных бурения и опробования скважин, проходки подземных горных выработок и интерпретации результатов МТЗ можно утверждать, что в подмерзлотной обстановке распространены воды двух классов: локально-трещинные и квазипластово-трещинные. Локально-трещинные воды свойственны массивам магматических пород и куполу регионально-метаморфизованных палеозойских толщ, развиваются и в литифицированных мезозойских осадочных толщах. С учетом того, что мощность КВ на них превышает глубину гипергенной трещиноватости, эти массивы можно считать аналогами гидрогеологических массивов, ранее выделенных в Восточной Сибири [Шенелёв и др., 1983]. Если воды локально-трещинного класса достаточно хорошо изучены, их связь с зонами разломов довольно наглядна, то квазипластово-трещинные воды исследованы недостаточно. Поэтому обращаем внимание на то, что квазипластовая трещиноватость возникает в монолитных осадочных породах при перемещениях их блоков по надвигам. Тектонофизические следствия таких перемещений активно изучаются [Семинский, 2003; Семинский и др., 2016; Danielsen, Dahlin, 2009]. Согласно выработанным представлениям, на стадии, предшествующей смещению блоков (пластов) пород, за счет геологического давления возникают зоны парагенетически связанных разрывов. Это опережающие трещины скола и отрыва, образующие зону трещиноватости. При даль-

нейшем нарастании давления трещины укрупняются, возникают магистральные сместители, по простиранию которых образуется слой тектонически дробленых пород (катаклазитов), часто сцементированных глиной трения (милониты). Мощность этого слоя в нашем случае не превышает 10 м, но из-за низкой водопроницаемости его можно рассматривать как водоупорную перегородку, которая делит ранее возникшую зону трещиноватости на два квазипластовых коллектора, гидродинамически слабо связанных.

Тектоническая активность проявляется и в образовании субвертикальных разломов или трещин, которые выполняются гидротермальным кварцем, каолином, рудными минералами и т. д. Эти жильные образования также слабопроницаемы и совокупно со сместителями образуют сеть относительно водонепроницаемых завес, которые разделяют квазипластовые трещинные коллекторы на фрагменты или секции. Эти завесы в основном затрудняют водообмен, но не препятствуют передаче гидростатического давления, что подтверждается связью поля пьезометрических уровней с уклонами дневной поверхности. Гидродинамическая изолированность их подтверждается быстрой (от 2–3 суток до нескольких недель) сработкой водных ресурсов при откачках (вплоть до осушения) изначально водоносных пород, различиями в химическом составе воды в близрасположенных секциях.

Автор считает, что слабой взаимосвязью водоносных секций объясняется и длительная сохранность криогенного напора, приобретенного при промерзании в условиях затрудненного оттока подмерзлотных вод. Относительно малые размеры замерзающих секций не позволяют накапливаться значительным объемам криогенно-метаморфизованной воды и создавать напоры, достаточные для разрушения естественных водонепроницаемых перегородок. Так как геокриологическая история Чукотского нагорья практически не изучена, для суждения о развитии ТМП в неоплейстоцене и голоцене привлечены данные по географически близкому району арктической Якутии [Гаврилов и др., 2000; Гаврилов, Тумской, 2001; Анисимов и др., 2002].

Эти данные позволяют считать, что за последние 420 тыс. лет прерывистость криолитозоны в Чукотском нагорье кардинально не менялась, хотя при голоценовом потеплении она развивалась в режиме деградации, при котором мощность криолитозоны уменьшилась, видимо, не менее чем в 1.5 раза. Поэтому в горных районах и речных долинах фрагментарная структура подмерзлотных водоносных слоев определила затрудненный водообмен, позволила сохранить криогенный напор и подземные воды, сформировавшиеся более 420 тыс. лет назад. Длительный контакт подзем-

ных вод и вмещающих пород способствовал обогащению воды солями угольной кислоты за счет взаимодействия с углисто-глинистыми сланцами и хлор-ионом, выщелоченным из них. В гидрогеологических массивах в зонах разломов активность водообмена выше, поэтому подмерзлотные воды здесь, возможно, имеют близкий к современному возраст.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты бурения скважин, проходки горных выработок и магнитотеллурического зондирования показывают своеобразие гидрогеологический условий в подмерзлотных толщах на востоке Чукотского нагорья и приводят к следующим заключениям и рекомендациям.

1. По условиям распространения и залегания подземных вод на площади Чукотского нагорья в гранитоидных массивах и палеозойских метаморфизованных породах сформировались гидрогеологические массивы с локально-трещинными водами. Классическим примером такого массива является Валькумейский. На тектонически активных сводово-надвиговых поднятиях сложилась своеобразная природная емкость, состоящая из трещиноватых водоносных пород, разделенных на секции относительно водонепроницаемыми завесами. Последние представляют собой тектонические брекчии, сцементированные милономом, глиной трения, кварцем и каолином, а также гидротермальные кварцевые и (или) каолиновые жилы.

2. Секционная структура подмерзлотных толщ способствовала формированию криогенного напора на всех элементах рельефа, в том числе на водоразделах, с превышением напорного уровня над дневной поверхностью и сохранением этих напоров до настоящего времени. Гидрогеологические структурные особенности вне сводово-надвиговых поднятий слабо изучены. По данным бурения в речных долинах можно предполагать существование здесь подмерзлотной секционной структуры.

Не исключено, что существование на водоразделах напорных подмерзлотных вод со статическим уровнем до 54.3 м выше устья скважин может быть связано с наличием локальных сквозных таликов в верховьях водотоков, например в днищах бывших ледниковых цирков или каров. Такие талики известны в западной части Чукотского нагорья, возможны и в восточной.

3. Существование подмерзлотных секций с затрудненным водообменом на малых глубинах благоприятно для создания подземных хранилищ жидких продуктов (пресных вод для питьевого водоснабжения, нефтепродуктов, токсичных жидких отходов и т. д.).

4. Необходимо проведение многолетних режимных наблюдений за уровнем, давлением и со-

ставом подмерзлотных вод, изучение возрастных показателей подземных вод по всей площади Чукотского нагорья и в прилегающих районах не только в речных долинах, но и на водоразделах.

5. Рекомендуется внедрение методов МТЗ в практику площадных и локальных мерзлотно-гидрогеологических исследований.

**Благодарности.** Автор благодарит Людмилу Петровну Глотову за помощь в подборе фактического материала и оформлении статьи, ведущего научного сотрудника СВКНИИ ДВО РАН, к.г.-м.н. Хасанова И.М. за помощь в изучении материалов магнитотеллурического зондирования, рецензентов за высказанные замечания, позволившие улучшить текст статьи, а также редакционную группу журнала.

### Литература

- Абрамов В.Ю.** Криогенная метаморфизация химического состава подземных вод // Разведка и охрана недр, 2014, № 5, с. 16–20.
- Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В.** Наледи-тарыны Северной Чукотки // Лед и снег, 2011, т. 51, № 4, с. 85–88.
- Анисимов М.А., Тумской В.Е., Саватюгин Л.М.** К вопросу об изменениях природных условий Новосибирских островов в позднем плейстоцене и голоцене // Изв. Рус. геогр. о-ва, 2002, т. 134, вып. 5, с. 32–37.
- Афанасенко В.Е., Замолотчикова С.А., Тишин М.И., Зуев И.А.** Северо-Чукотский регион // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, с. 280–292.
- Беликович А.В.** Природа и ресурсы Чукотки / А.В. Беликович, А.В. Галанин, А.А. Галанин и др. Магадан, СВНЦ ДВО РАН, 1997, 236 с.
- Бялобжеский С.Г., Горячев Н.А., Шпикерман В.И.** Кратоны и орогенные пояса Востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения России / Под ред. В.И. Ханчука. Владивосток, Дальнаука, 2006, кн. 1, с. 144–152.
- Волков А.В.** Месторождения золота и серебра Чукотки / А.В. Волков, В.И. Гончаров, А.А. Сидоров. М.; Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2006, 221 с.
- Гаврилов А.В., Тумской В.Е.** Эволюция температуры пород приморских низменностей Якутии в среднем и позднем плейстоцене // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 3–16.
- Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Романовский Н.Н.** Реконструкция динамики среднегодовой температуры пород на приморских низменностях Якутии и арктическом шельфе за последние 420 тысяч лет // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 4, с. 3–14.
- Гидрогеология СССР.** Т. 26. Северо-Восток СССР / Под ред. О.Н. Толстихина. М., Недра, 1972, 296 с.
- Глотов В.Е.** Талики районов горно-долинного оледенения в Заполярной Чукотке // Разведка и охрана недр, 2020, № 5, с. 28–36.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П.** Подземные воды Валькумейского оловорудного месторождения // Колыма, 2003, № 2, с. 21–28.
- Глотов В.Е., Глотова Л.П.** Связь фундамента Охотско-Чукотского вулcano-плутонического пояса с водными ресурсами зоны активного водообмена // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2013, № 4, с. 67–75.

**Глотов В.Е., Глотова Л.П.** Гидрогеология зоны активного водообмена на арктическом побережье Севера Дальнего Востока // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2015, № 1, с. 28–36.

**Глушкова О.Ю., Смирнов В.Н.** Неоплейстоценовые ледниковые комплексы на Северо-Востоке России // Наука на Северо-Востоке России: фундаментальные и прикладные исследования в Северной Пацифике и Арктике: Материалы науч. конф. (Магадан, 05–06.03.2020 г.). Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2020, с. 23–26.

**Ефимова Д.В., Романов В.В., Селецкий Ю.Б., Якубовский А.В.** Тритий и дейтерий в водах Западной и Центральной Чукотки // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 24. Магадан, Кн. изд-во, 1978, с. 169–174.

**Ефимова Д.В., Сабельников А.В., Синицкая В.М.** Анюйско-Чукотский регион // Инженерная геология. Т. 4. Дальний Восток / Под ред. Е.Г. Чаповского. М., МГУ, 1977, 157 с.

**Журавлев Г.Ф., Калинин С.А.** Тектоника // Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-59 (Билибино). Объяснит. зап. СПб., ВСЕГЕИ, 1999, с. 45–61.

**Основные** положения по составлению серийных легенд государственных геологических карт м-ба 1:200 000 и 1:1 000 000 / Науч. ред. Г.С. Вартамян. М., Геоинформ, 2001, 15 с.

**Пиннекер Е.В.** Проблемы региональной гидрогеологии: закономерности распространения и залегания подземных вод. М., Наука, 1977, 196 с.

**Ползунов Г.О.** Оценка Р–Т и fO<sub>2</sub> условий кристаллизации монцитонитовидов Велиткенайского гранит-пегматитового массива (арктическая Чукотка) по данным минеральной термобаро- и оксидометрии // Тихоокеан. геология, 2018, т. 37, № 5, с. 97–111.

**Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2003, 243 с.

**Семинский К.Ж., Зарипов Р.М., Оленченко В.В.** Тектонофизический подход к интерпретации данных малоглубинной электротомографии разломных зон // Геология и геофизика, 2016, т. 57, № 9, с. 1715–1729, DOI: 10.15392/GIG 20160910.

**Толстихин О.Н.** Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск, Наука, 1974, 162 с.

**Фотиев С.М.** Подземные воды криогенной области России (классификация) // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 41–59.

**Хасанов И.М., Шарафутдинов В.М.** Глубинная структура юго-востока Яно-Колымской складчатой системы по геофизическим данным и характерные особенности строения золоторудных узлов // Учен. записки Казан. ун-та. Естественные науки, 2011, т. 153, кн. 3, с. 1–17.

**Шепелёв В.В.** Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В. Шепелёв, О.Н. Толстихин, В.М. Пигузова и др. Новосибирск, Наука, 1983, 198 с.

**Шумихина М.К.** Гидрогеология // Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-59-(60) – Билибино. Объяснит. зап. СПб., ВСЕГЕИ, 1999, с. 68–74.

**Danielsen V.E., Dahlin T.** Comparison geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hollands’s Tunerel, Sweden // Engin. Geol., 2009, vol. 107, p. 118–129.

**URL:** vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/chukotsky\_ao/index.php (дата обращения: 10.07.2021).

## References

Abramov V.Yu. Cryogenic metamorphization of the chemical composition of groundwater. Razvedka i ohrana nedr [Exploration and Conservation of Mineral Resources], 2014, No. 5, p. 16–20 (in Russian).

Alekseev V.R., Gorin V.V., Kotov S.V. Naledi-taryny of Northern Chukotka. Led i Sneg [Ice and Snow], 2011, vol. 51, No. 4, p. 85–88 (in Russian).

Anisimov M.A., Tumskaya V.E., Savatyugin L.M. On the issue of changes in the natural conditions of the New Siberian Islands in the Late Pleistocene and Holocene. Izvestiya RGO [News of the Russian Geographical Society], 2002, vol. 134, iss. 5, p. 32–37 (in Russian).

Afanasenko V.E., Zamolotchikova S.A., Tishin M.I., Zuev I.A. North-Chukotka region. Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir’ i Dalnii Vostok [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Nedra, 1989, p. 280–292 (in Russian).

Belikovich A.V., Galanin A.V., Galanin A.A. et al. Priroda i resursy Chukotki [The nature and resources of Chukotka]. Magadan, SVNTs FEB RAS, 1997, 236 p. (in Russian).

Byalobzhesky S.G., Goryachev N.A., Shpikerman V.I. Cratons and Orogenic Belts of the East of Russia. Gepdinamika, magnetizm i metallogeniya Rossii [Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of Russia]. V.I. Khanchuk (Ed.). Vladivostok, Dalnauka, 2006, book 1, p. 144–152 (in Russian).

Volkov A.V., Goncharov V.I., Sidorov A.A. Mestorozhdeniya zolota i serebra Chukotki [Deposits of gold and silver in Chukotka]. Moscow; Magadan, SVKNII FEB RAS, 2006, 221 p. (in Russian).

Gavrilov A.V., Tumskoy V.E. The evolution of the mean annual ground temperature on coastal lowlands of Yakutia in Middle and Late Pleistocene. Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere], 2001, vol. V, No. 3, p. 3–16 (in Russian).

Gavrilov A.V., Tumskoy V.E., Romanovskii N.N. Reconstruction of the mean annual ground temperature dynamic on the Yakutian coastal lowlands and adjoining shelf during the last 420 kyr. Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere], 2000, vol. IV, No. 4, p. 3–14 (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. 26. North-East of the USSR]. O.N. Tolstikhin (Ed.). Moscow, Nedra, 1972, 296 p. (in Russian).

Glotov V.E. Taliki regions of mountain-valley glaciation in Zapolyarnaya Chukotka. Razvedka i ohrana nedr [Exploration and Protection of Mineral Resources], 2020, No. 5, p. 28–36 (in Russian).

Glotov V.E., Glotova L.P. Underground waters of the Valkumeysky tin ore deposit. Kolyma [Kolyma], 2003, No. 2, p. 21–28 (in Russian).

Glotov V.E., Glotova L.P. Relationship between the basement of the Okhotsk-Chukotka volcano-plutonic belt and the water resources of the active water exchange zone. Vestnik SVNC DVO RAN [Bulletin SVNTs FEB RAS], 2013, No. 4, p. 67–75 (in Russian).

Glotov V.E., Glotova L.P. Hydrogeology of the zone of active water exchange on the Arctic coast of the North of the Far East. Vestnik SVNC DVO RAV [Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences], 2015, No. 1, p. 28–36 (in Russian).

Glushkova O.Yu., Smirnov V.N. Neopleistocene glacial complexes in the North-East of Russia. In: Science in the North-East of Russia: fundamental and applied research in the North Pacific and the Arctic: Materials of Scientific. Conf. (Magadan, 05–06.03.2020). Magadan, SVKNII FEB RAS, 2020, p. 23–26 (in Russian).

- Efimova D.V., Romanov V.V., Seletskiy Yu.B., Yakubovskiy A.V. Tritium and deuterium in the waters of Western and Central Chukotka. In: Materials on geology and mineral resources of the North-East of the USSR. Issue 24. Magadan, Knizhnoe izd-vo, 1978, p. 169–174 (in Russian).
- Efimova D.V., Sabelnikov A.V., Sinitskaya V.M. Anyui-Chukotka region. Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology. Vol. 4. Far East]. E.G. Chapovsky (Ed.). Moscow, Moscow State University, 1977, 157 p. (in Russian).
- Zhuravlev G.F., Kalinin S.A. Tectonics. In: State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (new series). Sheet R-59 (Bilibino). Explanatory letter. St. Petersburg, VSEGEI, 1999, p. 45–61 (in Russian).
- Basic provisions for the compilation of serial legends for state geological maps of scale 1:200,000 and 1:1,000,000. Moscow, Geoinform, 2001, 15 p. (in Russian).
- Pinneker E.V. Problemy regional'noi geologii [Problems of Regional Hydrogeology: Patterns of Distribution and Occurrence of Groundwater]. Moscow, Nauka, 1977, 196 p. (in Russian).
- Polzunenkov G.O. Estimation of P–T and fO<sub>2</sub> conditions of crystallization of monzonitoids of the Velitkenai granite-pegmatite massif (Arctic Chukotka) according to the data of mineral thermobar- and oxybarometry. Tikhookeanskaya Geologiya [Tikhoocean. Geol.], 2018, vol. 37, No. 5, p. 97–111 (in Russian).
- Seminsky K.Zh. Vnutrennyaya structura kontinentalnykh razlomnykh zon [Internal Structure of Continental Fault Zones: Tectonophysical Aspect]. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2003, 243 p. (in Russian).
- Seminsky K.Zh., Zaripov R.M., Olenchenko V.V. Tectonophysical approach to the interpretation of shallow electrotamography data of fault zones. Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics], 2016, vol. 57, No. 9, p. 1715–1729.
- Tolstikhin O.N. Naledi i podzemnye vody Severo-Vostoka SSSR [Overlapping and underground waters of the North-East of the USSR]. Novosibirsk, Nauka, 1974, 162 p. (in Russian).
- Fotiev S.M. Underground waters of cryogenic area of Russia (classification). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 2, p. 41–59 (in Russian).
- Khasanov I.M., Sharafutdinov V.M. The deep structure of the southeast of the Yano-Kolyma fold system according to geophysical data and the characteristic features of the structure of gold ore nodes. Uchenye zapiski Kazan University. Natural sciences, 2011, vol. 153, book 3, p. 1–17 (in Russian).
- Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Pigusova V.M. et al. Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya Vostochnoi Sibiri [Permafrost-hydrogeological Conditions of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 198 p. (in Russian).
- Shumikhina M.K. Hydrogeology. In: State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (new series). Sheet R-59-(60) – Bilibino. Explanatory letter. St. Petersburg, VSEGEI, 1999, p. 68–74 (in Russian).
- Danielsen V.E., Dahlin T. Comparison geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hollands's Tunerel, Sweden. Engin. Geol., 2009, vol. 107, p. 118–129.
- URL: [vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/chukotsky\\_ao/index.php](http://vsegei.ru/ru/info/gisatlas/dvfo/chukotsky_ao/index.php) (last visited: 10.07.2021).

*Поступила в редакцию 13 мая 2021 г.,  
после доработки – 28 июля 2021 г.,  
принята к публикации 26 сентября 2021 г.*