

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР И ЕГО ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СКВАЖИНАХ (ОПЫТ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АКВАТОРИИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ)

<sup>1</sup>Тулатин А.В., <sup>1</sup>Рокос С.И., <sup>1</sup>Длугач А.Г., <sup>1</sup>Куликов С.Н., <sup>2</sup>Белов М.В., <sup>3</sup>Жуков К.С., <sup>4</sup>Петров Е.О., <sup>4</sup>Прищепенко Д.В.

<sup>1</sup>АО «АМИГЭ», Мурманск, Россия

<sup>2</sup>ООО «СПЛИТ», Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО «Петрофайбер», Москва, Россия

<sup>4</sup>ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты измерения температур в стратиграфической скважине DL-1 глубиной 246 м от дна, пробуренной в Восточно-Сибирском море в районе поднятия Де-Лонга. В верхней части разреза (до глубин 181 м) выделяются положительные температурные аномалии: +3.51°C (на глубине 49 м), +4.50°C (на глубине 96 м) и +5.023°C (на глубине 181 м), которые коррелируются с положением предполагаемых водоносных пластов. Проанализировано возможное влияние гидрогеологического фактора на формирование данных аномалий и даны рекомендации по выявлению зон притока термальных пластовых после установки измерительной линии и последующей минимизации данного влияния на контрольные температурные измерения.

Ключевые слова: *Восточно-Сибирское море, подземные воды, скважинная термометрия, метод распределенных температурных датчиков, гидрогеологический фактор, метод распределенных датчиков градиента температуры*

**Введение.** Работы выполнялись в рамках объекта ФГБУ ВСЕГЕИ «Геологическое изучение континентального шельфа Российской Федерации с целью подготовки дополнительных обосновывающих геологических материалов к защите Заявки России от 03.08.2015 в Комиссии по границам континентального шельфа».

На большей части Арктического шельфа широко распространены многолетнемерзлые породы (ММП), содержащие в своем составе лед и охлажденные грунты, изучение которых, помимо научного интереса, имеет и прикладное практическое значение, в силу того, что данные образования нередко ассоциируются с геотехническими рисками и горно-геологическими осложнениями [Рокос и др. 2009].

Скважинная термометрия - геофизический метод, позволяющий оценить температурный профиль разреза скважины и выявить зоны мерзлых льдистых отложений и охлажденных грунтов. Термометрия в скважинах может выполняться как после процесса бурения (температурный каротаж), так и путем оставления термометрической косы в скважине с целью проведения замеров после установления естественных температур в околоскважинном пространстве. В последнем случае, для корректной регистрации температурных данных, принципиальное значение имеет время выстойки, поскольку естественные температуры отложений при бурении скважины изменяются.

С одной стороны, нарушение естественного температурного фона связано с техногенным разогревом пород околоскважинного пространства в процессе бурения. Среди факторов, определяющих интенсивность данного явления, принято выделять: тип бурения, режим и длительность данного процесса, тип бурового раствора и его температур [Череменицкий, 1972; Prenskey, 1992; Schumacher and Moeck, 2020]. С другой стороны, свой вклад в искажение температуры могут вносить подземные воды, роль которых будет определяться наличием тектонических разломов и связанных с ними зон трещиноватости, а также системой водоносных горизонтов и водоупоров. При бурении скважины, естественная гидрогеологическая модель нарушается, вследствие чего вдоль ствола скважины и околоскважинном пространстве происходят сложные физико-

химические процессы (инфильтрация промывочной жидкости, смешение растворов различного состава и засоленности, тепловая конвекция и т.д.), приводящие к искажениям первоначальных температур вдоль профиля наблюдений.

В данном тезисе будут рассмотрены данные скважинной термометрии, выполненной в одной из малоуглубинных скважин акватории Восточно-Сибирского моря в районе поднятия Де-Лонга; приведен анализ выявленных температурных аномалий; и, представлена возможная модель, которые могла объяснить появление данных аномалий.

**Литология, гидрогеологические и геокриологические условия.** В разрезе скважины DL-1 вскрываются отложения осадочного чехла и прикровельной части платформенного фундамента района поднятия Де-Лонга. Предполагается, что образования осадочного чехла в интервале 0-187 м от дна, представлены преимущественно кайнозойскими образованиями, которые сложены нелитифицированными и слаболитифицированными глинистыми отложениями. Нижняя часть разреза вероятно сложена мезозойскими отложениями (меловыми?). В составе образований чехла преобладают размокающие суглинки и глины тугопластичной-твердой консистенции. С глубины 231 м залегают неразмокаемые аргиллиты и аргиллитоподобные (слаборазмокающие) глины с редкими прослоями алевролитов и песчаников. Отложения предполагаемого фундамента, вскрытого на глубине 187 м представлены в основном слаболитифицированными аргиллитами и аргиллитоподобными глинами.

В ряде интервалов, пробуренных без отбора керна, по характеру проходки и наличию водопроявления, предполагается наличие межпластовых водоносных горизонтов, которые вероятно представлены песками рыхлого и среднеплотного сложения. Мощность таких интервалов варьирует в пределах первого десятка метров. Также, предполагается, что гидрогеологическая система района бурения включает и другой тип подземных вод – трещинный. Фильтрационная миграция этих вод может быть связана с зонами разломов, которые выделяются по сейсмическим данным. Обобщенный структурный анализ показывает, что данная сеть разломов прослеживается от пород фундамента вплоть до подошвы предполагаемых плиоцен-четвертичных отложений.

Многолетнемерзлые породы, содержащие в своем составе лед, в керне пробуренной скважины не установлены. Однако, имеются косвенные признаки того, что осадочные образования данного района испытывали промерзание в течение последней регрессии (сартанское время) и ранее находились в мерзлом состоянии. Предполагается, что к сегодняшнему дню лед в них полностью растаял в результате теплового воздействия придонных вод с температурой, превышающей точку таяния.

**Методика проведения работ.** Малоуглубинная стратиграфическая скважина DL-1 глубиной 246 м была пробурена в акватории Восточно-Сибирского моря в районе поднятия Де-Лонга при глубине моря около 48 м в период с 15 по 18 сентября 2022 г. Бурение проводилось колонной собранной из труб СТБ-127 и УБТ-178 (низ колонны) с бурголовкой истирающе-режущего типа диаметром 215.9 мм. При бурении с отбором керна применялся съёмный пробоотборник с внутренним диаметром 82 мм (диаметр керна). Интервалы без проботбора керна проходились данной компоновкой сплошным забоем, путем полного размыва отложений. При бурении использовалась открытая система промывки скважины. Тип бурового раствора- глинистый и/или забортная морская вода.

Термометрические работы в пределах изучаемой скважины выполнялись коллективом АО “АМИГЭ” в партнерстве ООО “ЦАСД МГУ” и ООО “Петрофайбер”.

Измерения температур выполнялись методом скважинной DTS (Distributed Temperature Sensing) термометрии, с помощью опускаемого в скважину оптоволоконного кабеля, который использовался в качестве измерительной линии. Смысл технологии DTS сводится к тому, что в регистрирующую линию, с определенной периодичностью, посылаются лазерный импульс, который в результате неэластичного взаимодействия падающего света с молекулами материала оптического волокна, формирует, отклик в

обратно-рассеянного Рамановского излучения [Großwig et al., 1996]. Отношение интенсивностей компонент данного отклика (Стоксовская – слабо зависящая от температуры; и, анти-Стоксовская- строго зависящая от температуры), после калибровки в референсных точках на регистрирующей линии (значение температур в которых известно), конвертируются в значения абсолютных температур вдоль линии приёма [Hurtig et al., 1996].

Технология проведения температурных DTS измерений в морской скважине была аналогична традиционной термометрии: после бурения скважины в нее опускался измерительный оптоволоконный кабель; буровая колонна поднималась; судно сходило с места бурения для “выстаивания” скважины; после времени предполагаемого установления естественных температур, к измерительному блоку подключался свободный конец измерительной линии и производились измерения температуры.

Скважинная термометрия выполнялась регистратором ВОСК-Т (ООО “Петрофайбер”), который позволял регистрировать данные с шагом равным 1 м, при температурном и пространственном разрешениях не хуже 1 °С и 1 м (соответственно). В качестве измерительной линии использовался специализированный геофизический оптоволоконный кабель НКО-90-9кН (производитель ООО “НКО”).

Важным этапом температурных измерений с помощью технологии DTS является калибровка [Tyler et al, 2009; Bens et al, 2016; Hausner et al, 2011]. Методика калибровки сводилась к следующему: оптоволоконный кабель (пара оптических волокон которого в призабойной части сваривалась, образуя единый измерительный контур) в двух интервалах (палубная часть кабеля) перед погружением в скважину сматывался в небольшие бухты и помещался в емкости с различными известными температурами (измерялись высокоточным термометром).

Для отслеживания динамики изменения температурного режима, в ходе полевых работ было выполнено две итерации температурных измерений (18.09.2022 и 23.09.2022): первая, сразу после бурения скважины и, вторая, после выстойки скважины (спустя 5 суток после окончания бурения).

**Результаты и обсуждение.** Согласно полученным в результате измерений данным (после выстойки (Рис. 1)), температурный профиль варьирует от минимальных значений - 1.26 °С (у морского дна) до +5.023 °С (на глубине 181 м). Анализ полученной зависимости позволяет выделить три локальных температурных максимума в пределах температурного профиля: +3.51°С на глубине 49 м; +4.5°С на глубине 96 м; и, +5.023°С на глубине 181 м. Заметим, что для первых двух аномалий (на глубинах 49м и 96 м) отмечается некоторая унаследованность в форме температурных кривых.

Рассматривая характер изменения температурной зависимости с глубиной, заметим, что ниже морского дна, температурный профиль начинает градиентно увеличиваться из области отрицательных в область положительных температур, достигая своего первого локального максимума (+3.51°С). На глубине 55 м отмечается резкое понижение температуры, которая ближе к 77 м начинает опять увеличиваться. Мощность второй аномалии (по глубине) достигает 30 м. Мощность третьей температурной аномалии составляет около 20 м.

Следует отметить, что полученная в скважине температурная зависимость контрастирует с общим представлением об изменении температур в акватории арктических морей. Согласно проведенным исследованиям и температурному моделированию [Рокос и др., 2009; Shakhova et al, 2017], предполагается, что в пределах первой сотни метров температуры грунтов будут варьировать в диапазоне -2.5 °С до 0.0 °С, характеризуясь отсутствием нормального геотермического градиента. Для полученных температурных данных, как можно видеть из Рис. 1, отмечается осредненный положительный температурный градиент близкий к +1 °С на 50 м. Возможная причина несоответствия полученных и рассчитанных модельных данных, на наш взгляд, может объясняться недостаточным временем выстойки скважины.

Сопоставление полученных температурных зависимостей с литологией вскрытого разреза, как можно заметить из Рис. 1, показывает, что температурные аномалии уверенно коррелируются с песками и песчанистыми отложениями и пропластками крупнообломочных пород (коллекторами), в то время как для глинисто-суглинистых толщ и литифицированных аргиллитов они не характерны.

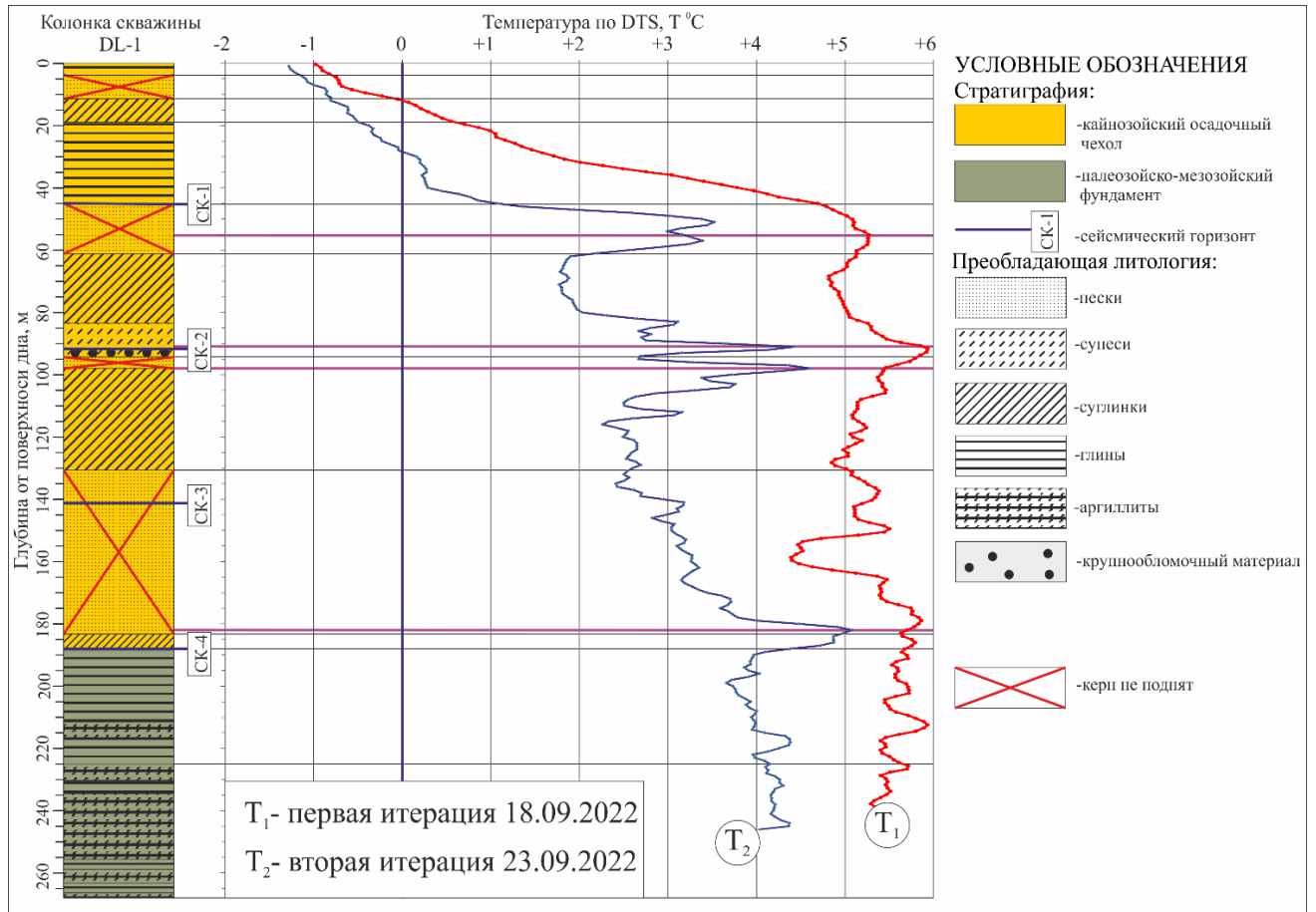


Рис. 1. Корреляция данных DTS-термометрии (две итерации) с литологическим разрезом.

На Рис. 2-А показан проинтерпретированный сейсмоакустический разрез с наложенными температурными кривыми. Заметим, что район исследований осложнен тектоническими нарушениями, влияние которых, на наш взгляд, могло иметь преобладающее влияние на формирование выявленных температурных аномалий. Одно из предположений о природе данных температурных аномалий может быть связано с сетью разрывных нарушений, по зонам разуплотнений которых, термальные (элизонные?) воды инфильтруются в пласты коллекторы. Далее, по пластам-коллекторам, регулируемые пластовым давлением, трещинные воды поступают в скважину. Заметим, что абсолютные значения температурных аномалий увеличиваются ближе к забою. Это может быть объяснено как количеством примешиваемых вод вдоль пути следования, которые характеризуются низкими температурами (как и сами отложения), так и различными пластовыми давлениями (коллекторскими свойствами пластов), которые ответственны за скорость фильтрации, а соответственно, и за скорость остывания пластовых вод. Положительный градиент объясняется нами конвективной моделью циркуляции термальных вод в скважине, при которой относительно более теплые воды (аномалия на глубине 181 м) медленно поднимаются вверх постепенно остывая. На Рис. 2-В представлена возможная гидрогеологическая модель, иллюстрирующая вышеприведенный сценарий.

С другой стороны, нельзя также исключать и влияние техногенного фактора бурения на формирование данных температурных аномалий: вода для изготавливаемого бурового раствора была близкой к  $+10^{\circ}\text{C}$ , который при закачке в скважину мог проникать в пласты-коллекторы, формируя достаточно мощную по латерали зону температурного изменения (температурной оторочки). Предполагается, что температура в данной зоне, из-за недостаточности времени выстойки скважины, могла не успеть прийти в равновесное состояние, характеризующее естественные температуры пород в условиях ненарушенного залегания.

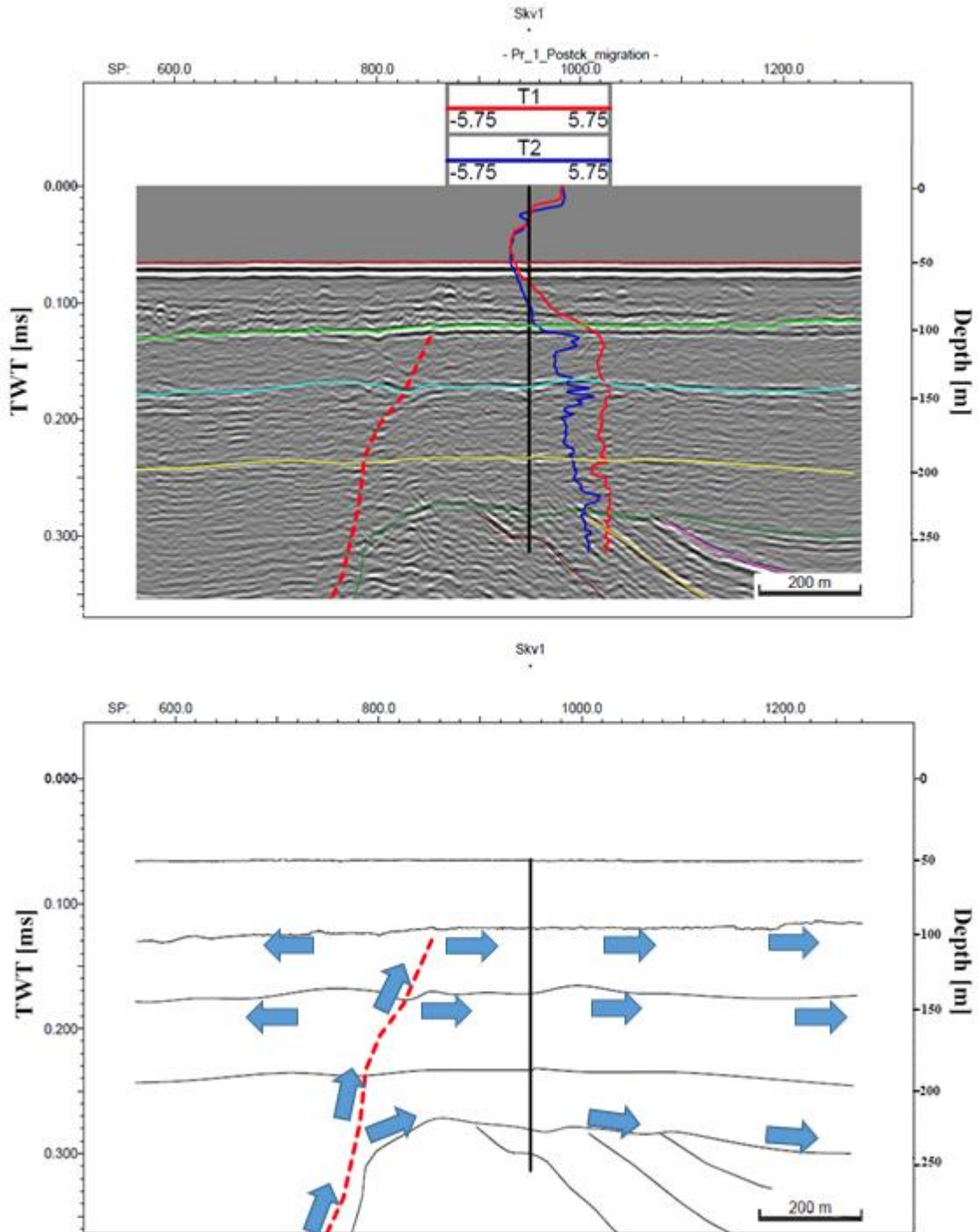


Рис. 2. Сейсмоакустический разрез через изучаемую скважину (А) и предполагаемая модель миграции гидротермальных вод (В).

Рассматривая два вышеприведенных сценария возможного влияния на зарегистрированные температурные данные, нужно отметить, что время необходимой выстойки для каждого из них по всей видимости будет существенно различаться: в первом случае, циркулирующие в скважине термальные воды, подпитываясь с трех разных пластов-коллекторов, по всей видимости будут способствовать более длительному промежутку времени, необходимому для температурного выравнивания (вероятно месяцы); во втором случае, за отсутствием активного притока, времени для выстойки скважины вероятно потребуются много меньше (недели).

Активное проявление притока вод в скважину во время бурения (особенно из относительно глубоких горизонтов) больше склоняет нас к предположению о гидрогеологическом образовании зарегистрированных температурных аномалий. В то же время, для однозначного понимания какая именно причина приводит к искажению данных, необходима технология определения притока в скважину (особенно если водопроявление в скважине малоактивно).

Distributed Temperature Gradient Sensing (DTGS), или метод распределенных датчиков градиента температуры – это производная технологии распределенных акустических систем, оперирующая низкочастотным интервалом приращения фазы (ниже 10 Гц), который чувствителен к измерению градиента температуры [Lauber and Less, 2021]. DTGS- технология позволяет измерять быстро меняющийся градиент температуры с высоким разрешением ( $0.001^{\circ}\text{C}$ ), без фактического измерения абсолютной температуры [Joode, 2021].

Очевидно, что зоны притока термальных вод в скважину (их динамика) будут характеризоваться изменением температурного градиента, что, может быть определено с помощью технологии DTGS. В случае с повышенными температурами, вызванными инфильтрацией теплого бурового раствора в пласты-коллекторы, краткосрочных изменений температуры (градиента) наблюдаться не будет.

**Выводы и рекомендации.** Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- Гидрогеологический фактор может существенно исказить данные температурных измерений в скважинах;
- Температурные аномалии также могут быть связаны с техногенными явлениями процесса бурения;
- Время выстойки скважины для термометрических измерений во многом зависит от природы температурных искажений;
- Метод распределенных датчиков градиента температуры - DTGS может быть рекомендован для определения фактора искажения температуры;
- Зная природу фактора, искажающего скважинные температурные измерения, можно спрогнозировать необходимое время выстойки скважины.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность руководству ФГБУ ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского за предоставленную возможность публикации материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С., Костин Д.А., Куликов С.Н. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. № 10. с. 38-41

Черемный Г. А. Геотермия, Л.: 1972, 272 с.

Bense V.F., Read T., Bour O., Borgne T.Le., Coleman T., Krause S., Chalari A., Mondanos M., Ciocca F., Selker J.S. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology // Water Resources Research. 2016. Vol. 52. Is. 12. P. 9259-9273. doi: 10.1002/2016WR018869

Großwig S., Hurtig E., Kühn K. Fibre optic temperature sensing: A new tool for temperature measurements in boreholes // *Geophysics*. 1996. Vol. 61. Is. 4. P. 1065-1067. doi:10.1190/1.1444027

Joode A. Leak detection and monitoring // *Pipeline Technology Journal*. 2021. 2:21.

Hausner M.B., Suárez F., Glander K.E., van de Giesen N., Selker J.S., Tyler S.W. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data // *Sensors (Basel)*. 2011. Vol. 11. Is. 11. P. 10859-10879. doi: 10.3390/s111110859.

Hurtig E., Großwig S., Kühn K. Fibre optic temperature sensing: application for subsurface and ground temperature measurements // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 257. Is. 1. P. 101–109. doi: 10.1016/0040-1951(95)00124-7

Lauber T., Lees G. Enhanced Temperature Measurement Performance: Fusing DTS and DAS Results, // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21. Is. 6, P. 7948-7953. doi: 10.1109/JSEN.2020.3046339

Prensky S. Temperature measurements in boreholes: An overview of engineering and scientific applications // *The Log Analyst*. 1992. Vol. 33. Is. 3. P. 313-333.

Schumacher S., Moeck I. A new method for correcting temperature log profiles in low-enthalpy plays // *Geothermal Energy*. 2020. Vol. 8. doi: 10.1186/s40517-020-00181-w

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communication*. 2017. Vol. 8. Is. 15872. doi:10.1038/ncomms15872

Tyler S., Selker J., Hausner M., Hatch C., Torgersen T., Thodal C., Schladow S. Environmental Temperature Sensing Using Raman Spectra DTS Fiber-Optic Methods // *Water Resour. Res.* 2009. Vol. 45. doi:10.1029/2008WR007052.

## **A HYDROGEOLOGICAL FACTOR AND ITS POSSIBLE IMPACT ON TEMPERATURE MEASUREMENTS IN BOREHOLES (AN EXPERIENCE OF THE BOREHOLE TEMPERATURE MEASUREMENTS IN THE EAST SIBERIAN SEA)**

<sup>1</sup>Tulapin A., <sup>1</sup>Rokos S., <sup>1</sup>Dlugach. A., <sup>1</sup>Kulikov S., <sup>2</sup>Belov M., <sup>3</sup>Zhukov K., <sup>4</sup>Petrov E.,  
<sup>4</sup>Prischepehko D.

<sup>1</sup> JSC «AMIGE», Murmansk, Russia

<sup>2</sup> LLC «SPLIT», Moscow, Russia

<sup>3</sup> LLC «Petrofiber», Moscow, Russia

<sup>4</sup> VSEGEI, St. Petersburg, Russia

The results of the temperature measurements obtained from the shallow-depth borehole drilled in the East Siberian Sea have been introduced. In the upper part of the geological section (up to 181 m) some temperature anomalies have been detected (+3.51°C, +4.5°C and +5.023°C), which are correlated with the depths of the porous formations. A possible impact of the hydrogeological factor on these temperature anomaly occurrences has been analyzed. Some recommendations to identify zones of the borehole thermal water infiltration, as well as measures to minimize its impact on the borehole temperature measurements have been given.

Keywords: *Permafrost deposits, borehole thermometry measurements, DTS technique, hydrogeological factor, DTGS technique*