

УДК 552.53(571.5)

Новый метод прогнозирования соленосных толщ Восточной Сибири

**С.Б. Коротков^{1*}, С.М. Карнаухов¹, А.В. Ступакова², А.А. Суслова²,
Р.С. Сауткин², А.В. Корзун²**

¹ ООО «Инновационные нефтегазовые технологии», Российская Федерация, 107014,
г. Москва, ул. Обручева, д 36, к. 2

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

* E-mail: s.korotkov@iogt.ru

Ключевые слова:
метод,
прогнозирование,
соленосная толща,
арктический
шельф,
вариативность
солености,
придонные воды,
газ,
нефть.

Тезисы. Выносятся на обсуждение новый метод прогнозирования зон возможного распространения соленосных толщ и соляной тектоники с использованием комплекса геофизических, гидрогеологических и океанографических данных.

Уникальный солеродный бассейн Сибирской платформы может иметь продолжение в акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. При отсутствии пробуренных скважин судить о возможном наличии в разрезе соленосных формаций приходится по косвенным признакам. Авторы предлагают новый способ, сутью которого является изучение вариаций компонентного состава морской воды как показателя вертикальной восходящей разгрузки высокоминерализованных глубинных вод. Придонные «рапные озера», связанные с глубинными термофлюидами, известны в Мексиканском заливе, Красном и в Мертвом морях, в других местах Мирового океана, описаны в зарубежных и отечественных публикациях.

В 2018–2019 гг. в процессе анализа океанографических карт арктических морей России авторы пришли к выводу, что выявленные аномалии состава морской воды невозможно объяснить только влиянием рек и течений. Была замечена связь аномалий с определенными тектоническими зонами и особенностями геологического строения, отраженными на сейсмических разрезах. Сделан вывод о возможном наличии точечных зон разгрузки глубинных высокоминерализованных вод, что может служить прогнозным признаком присутствия галогенной формации в разрезе.

Стремительно развивающаяся аналитическая база позволяет определять наноконцентрации растворенных компонентов, их изотопов и редкоземельных элементов. Вариации составов стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$, $^{81}\text{Br}/^{79}\text{Br}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) отражают генетические признаки формирования рассолов. Определение изотопов ^{234}U и ^{238}U в водах, ранее невозможное в силу их низких концентраций, позволяет рассчитать возраст подземных вод.

Постоянное снижение стоимости аналитических измерений, их упрощение открывают широкие возможности применения метода в практике геологоразведочных работ. В комплексе с другими методами геологоразведки это позволит снизить риски строительства глубоких скважин и материальные затраты на ранних стадиях освоения углеводородных ресурсов арктического шельфа.

Несмотря на очевидные трудности промышленного освоения углеводородного потенциала континентального шельфа арктических морей, в долгосрочной перспективе альтернативы на суше нет. В настоящее время это один из немногих оставшихся неразведанных регионов, где с большой вероятностью могут быть открыты уникальные и крупные месторождения нефти и газа [1]. В принятом правительственном документе «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года» освоению арктического шельфа отводится приоритетная роль. Для успешной и эффективной реализации поставленных стратегических целей необходимо решить целый ряд серьезнейших научных и технологических задач, часть из которых известна, но некоторые только предстоит осмыслить. К числу последних можно отнести вопрос наличия либо отсутствия соленосных толщ в разрезе потенциально нефтегазоносных бассейнов восточносибирского арктического шельфа.

На прилегающей сухопутной части Сибирской платформы именно соленосные толщи являются единственной надежной региональной покрывкой уникальных и крупных газовых месторождений [2]. Но одновременно соли крайне негативно влияют на технологические процессы строительства скважин. Осложняющими факторами при строительстве скважин в подсолевых продуктивных пластах являются

текучесть соли, галокинез, рапопроявления, аномально высокие значения пластовых давлений, наличие высокотоксичных кислых газов, требующих применения устойчивых к коррозии материалов.

Колоссальная стоимость морского бурения компенсируется высокими дебитами и большими запасами углеводородов, меньшим количеством скважин и специфичной схемой разработки. Уменьшение количества поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, многократное удельное удорожание каждой скважины, а также необходимость обеспечения безопасности персонала, окружающей среды и оборудования предъявляют повышенные требования к безаварийности бурения, которая, в свою очередь, зависит от достоверности прогноза геологического разреза и выявления потенциально аварийных интервалов, наиболее часто встречающихся в соленосных толщах (подвижки солей и межсолевых глин, катастрофические рапопроявления и поглощения бурового раствора, кавернообразование).

Прогноз геофизическими методами рапоопасных зон даже на хорошо разведанных и разрабатываемых месторождениях (Астраханском, Карачаганакском, Оренбургском, Ковыктинском) до сих пор затруднителен и малодостоверен. Надежных технологий прогноза подобных зон на малоизученных арктических шельфовых объектах на данный момент не существует.

Достоверность прогноза интервалов и характеристик соленосных отложений особенно важна при проектировании первых глубоких скважин на арктических шельфах. Отсутствие пробуренных скважин в крупных секторах ряда восточных акваторий арктического шельфа и вероятное субгоризонтальное залегание соляных пластов усложняют задачу прогнозирования.

Целенаправленные поиски углеводородов на континентальном шельфе в Северном Ледовитом океане были начаты во второй половине прошлого столетия. Их пик пришелся на 1970–1980-е гг., когда на перспективных структурах Баренцева и Карского морей бурились поисково-разведочные скважины и были открыты уникальные по запасам Штокмановское, Русановское, Ленинградское, ряд других крупных месторождений газа и нефти. В промышленную разработку в декабре 2013 г. введено пока единственное морское

нефтяное месторождение Приразломное (открыто в 1989 г., глубина моря 20 м). Бурение скважин и добыча нефти здесь ведутся со стационарной морской ледостойкой платформы. Промышленное освоение других выявленных месторождений, удаленных от берега и достаточно глубоководных (с позиций установки стационарных платформ), оказалось очень сложной задачей. В 1990-е гг. предполагалось начать разработку Штокмановского месторождения в Баренцевом море, и для этого выполнен большой комплекс работ, но в итоге проект был «заморожен». В акватории замерзающего на долгие месяцы Карского моря задачи существенно усложняются. Еще большие сложности ожидаются в арктических морях, омывающих с севера территорию Восточной Сибири.

Соленосные (эвапоритовые) формации имеют широкое распространение в Мировом океане. Термин «эвапориты» отражает представления исследователей об образовании пород (гипсов, ангидритов, галитов) в результате выпаривания морской воды. Существуют альтернативные точки зрения, отрицающие такую модель соленакопления. Так, В.А. Строганов обращает внимание на то, что мощные соленосные формации на нашей планете накапливались в эпохи глобальных или региональных оледенений, когда отмечены наихудшие условия для «выпаривания» [3]. Крупнейшая генерация солей в пермскую галогенную эпоху (62 % мировых запасов) совпадает по времени с величайшей на планете эпохой оледенения. И другая закономерность: все солеродные бассейны образовались после или во время формирования близлежащих горных сооружений, когда возникали и возобновлялись глубинные разломы земной коры, магматические расплавы изливались на поверхность [3].

На парагенетическую связь эффузивных, магматических и «эвапоритовых» пород, доказывающую глубинный генезис соли, сегодня обращают внимание многие исследователи, и число их постоянно увеличивается. Рост соляных диапиров связывается не с пластичным перетеканием соли под воздействием литостатического давления, а с непрерывно-прерывистым поступлением рапы по субвертикальным флюидоканалам и выпадением солей в осадок при изменении термобарических условий. В «спокойные» периоды в канале образуется твердая фаза (пробка), в периоды активизации «гидродомкрат» толкает ее вверх.

Выходы высокоминерализованных глубинных растворов по вертикальным трубообразным каналам («курильщики») по типу базальтовых лав установлены в Красном и Мертвом морях, в Атлантическом и Тихом океанах [4].

С соленосными формациями ассоциируют богатые нефтегазоносные бассейны Северного моря, Атлантического океана (Бразилия, Ангола), Мексиканского и Персидского заливов, Средиземного моря [5, 6]. По мере продвижения фронта геологоразведочных работ на все большие глубины именно соленосные отложения являются наиболее надежными, а нередко и единственными покрывками, особенно для высоконапорных газовых залежей.

Данных о распространении соленосных толщ в акватории Северного Ледовитого океана пока немного [7]. Соленосные отложения каменноугольно-нижнепермского возраста известны на Восточном Шпицбергене, на о. Эдж, на юге архипелага Новая Земля,

на Северной Земле (ордовик) и в Нордвик-Хатангском районе (девон). По геофизическим данным присутствие соленосных отложений с признаками солянокупольной тектоники предполагается на шельфах Канадского Арктического архипелага, в западной части баренцевоморского шельфа, в северной части карского шельфа, в Хатангском заливе моря Лаптевых (рис. 1, 2) [8].

Данных о соленосных отложениях в других восточных районах российского арктического шельфа пока нет, но наличия таких отложений исключить нельзя. На сегодняшний день наибольшую сложность представляет идентификация субгоризонтальных галогенных пластов, которые визуальнo не выделяются на сейсмических разрезах, в отличие от куполов и штоков. Спокойное многопластовое залегание кембрийских солей характерно для Чаядинского, Ковыктинского и других газоконденсатных и нефтяных месторождений

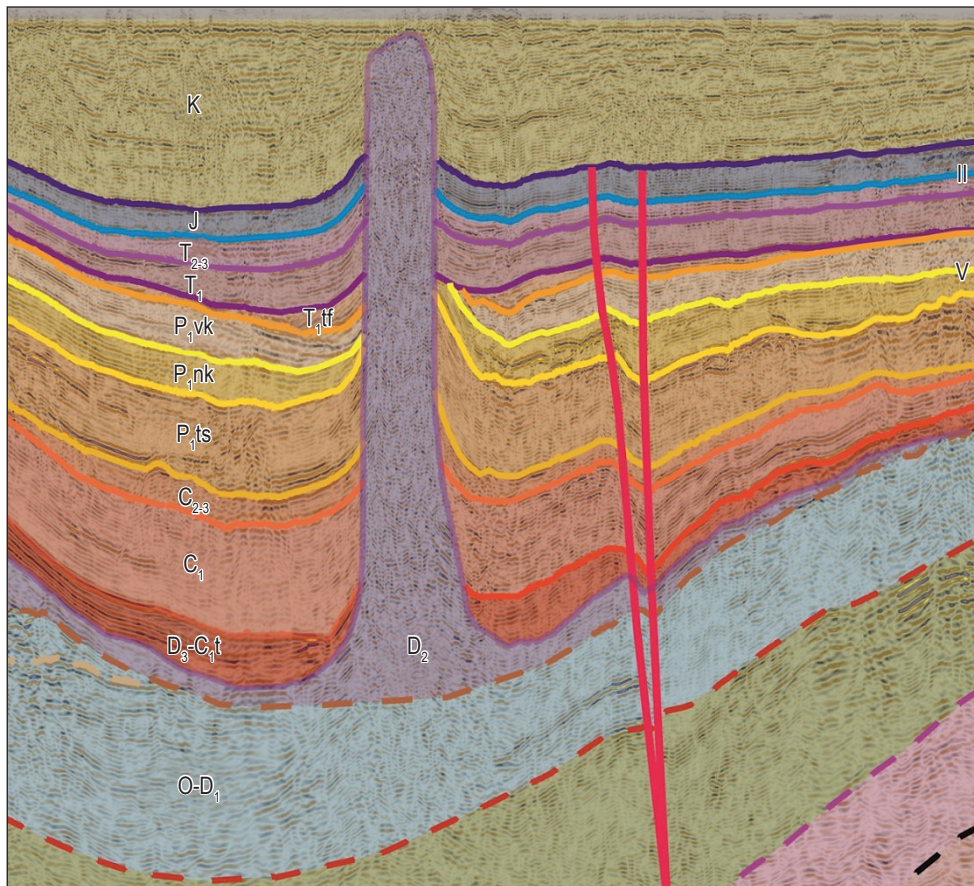


Рис. 1. Пример соляного штока в море Лаптевых (район р. Хатанги): придонный разрез над куполом штока может иметь ослабленные газонаполненные зоны, представляющие опасность для бурения (А.В. Ступакова, Р.А. Сауткин, А.А. Суслова и др., 2013 [8] с использованием материалов НПО «Южморгеология»)

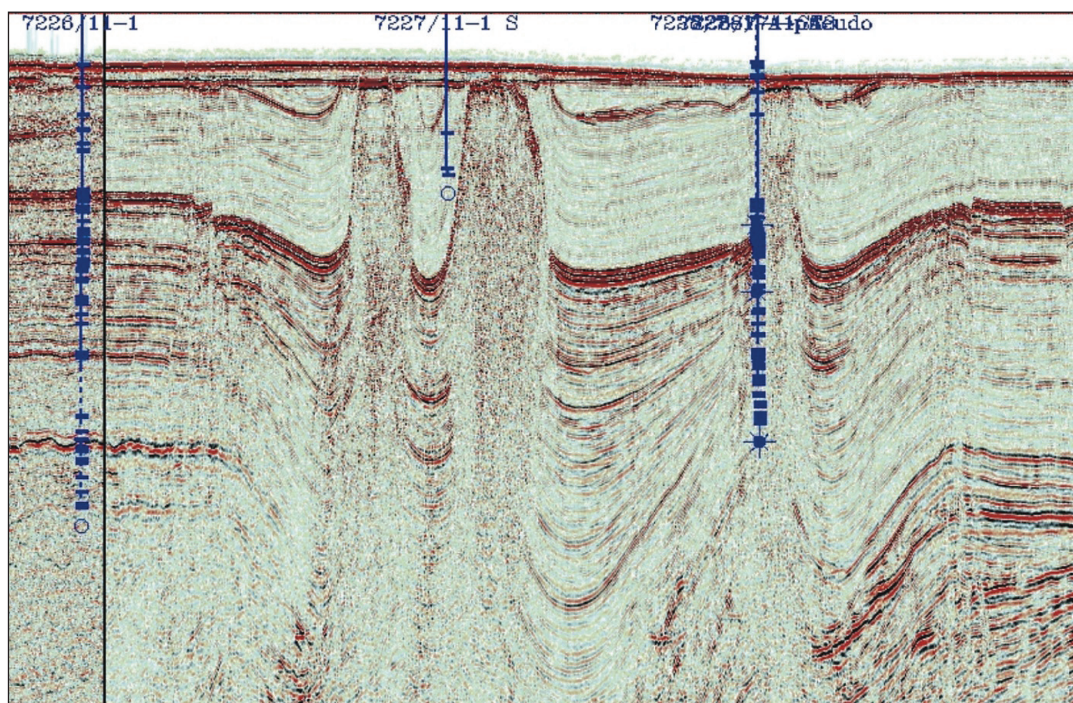


Рис. 2. Пример соляных штоков в норвежском секторе Баренцева моря
(А.В. Ступакова, Р.А. Сауткин, А.А. Суслова и др., 2013 [8] с использованием
данных компании Petroleum Geo-Services)

Восточной Сибири, где связанные с солями осложнения и аварии при строительстве скважин оборачиваются многомиллионными убытками. В случае аналогичных аварий на морских месторождениях финансовые потери будут в десятки-сотни раз больше, а ликвидация аварий в ряде случаев окажется невозможной.

Предлагаемый авторами метод позволяет прогнозировать наличие соленосных отложений на арктических шельфах до бурения первых глубоких скважин. В 2018–2019 гг. в ходе анализа океанографических карт арктических морей России была отмечена вариативность солености морской воды (у поверхности и в придонном интервале) в различных тектонических и нефтегазоносных районах. Классическое «океанографическое» представление о влиянии рек и течений на изменение солености по площади и послойно не дает, на взгляд авторов, адекватного объяснения. Определенная закономерность проявляется при сопоставлении данных об изменении солености вод с геологическими материалами, и при достаточной точности гидрологических замеров с ее помощью возможно прогнозировать распространение соленосных отложений, соляных куполов и ослабленных донных зон кэпрока.

Метод базируется на предположении (гипотезе) о наличии в придонных осадках точечных зон разгрузки глубинных высокоминерализованных вод над соляными диапирами и разломами. Естественно, речь идет не о размыве самих куполов, обнажающихся на морском дне (маловероятно), а о выходах рапы. Придонные «рапные озера», связанные с глубинными термофлюидами, установлены в Мексиканском заливе, Красном море и других местах Мирового океана, описаны в зарубежных и отечественных публикациях.

Экспресс-анализ сейсмических данных о Баренцевом море показывает, что серии соляных куполов «протыкают» осадочный разрез практически до придонных слоев, и, следовательно, подток высокоминерализованных вод по субвертикальным ослабленным, трещиноватым, зонам в этих местах весьма вероятен. Аналогичная ситуация наблюдается, по сейсмическим данным (скважины отсутствуют), в Северо-Карском тектоническом районе Карского моря, а повышенная соленость (несмотря на огромный объем выноса пресных вод р. Оби), возможно, является признаком наличия придонных зон разгрузки высокоминерализованных растворов.

Повышенная соленость придонных вод и/или изменение компонентного состава вод могут служить прогнозными признаками присутствия галогенной формации в разрезе. В настоящее время нефтегазовая гидрогеохимия переживает ренессанс вследствие стремительного развития аналитической базы, позволяющей определять компоненты в поровой воде донных отложений в нано- и меньших концентрациях.

За более чем полувековую историю изучения многих бассейнов установлена связь между морскими месторождениями нефти и газа, зонами разгрузки глубинных вод и выявляемыми над ними гидрогеохимическими и биогеохимическими аномалиями в донных отложениях и придонных водах. Огромный интерес для оценки возможной субвертикальной разгрузки глубинных вод кроме привычного комплекса макро- и микрокомпонентов представляют определения изотопов и редкоземельных элементов. Аналитические технологии постоянно упрощаются, стоимость анализа проб снижается. Вариации состава стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$, $^{81}\text{Br}/^{79}\text{Br}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) являются важнейшим генетическим признаком формирования рассолов в результате либо растворения галогенных горных пород, либо глубокого преобразования захороненной рапы солеродных бассейнов в условиях различной степени закрытости гидрогеологических систем. Определение изотопов ^{234}U и ^{238}U в водах, ранее технологически невозможное в силу низких концентраций, позволяет определить возраст подземных вод, хотя и с ограничением до первых миллионов лет.

Таким образом, комплексное изучение химического и изотопного составов поровых вод донных отложений, пластовых флюидов и морской воды позволит с высокой вероятностью выявлять наличие в разрезе галогенных толщ и вертикальной восходящей разгрузки по ослабленным фильтрационным зонам.

Список литературы

1. Ступакова А.В. Перспективы открытия новых месторождений в пределах арктического шельфа / А.В. Ступакова, А.А. Сулова, Р.С. Сауткин и др. // Вести газовой науки. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 4 (28): Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – С. 154–166.
2. Франчук А.А. Геолого-геофизические характеристики солесодержащих флюидоупоров Сибирской платформы / А.А. Франчук, С.Б. Коротков, Е.В. Семёнова // Вести газовой науки. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 3 (31): Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России. – С. 162–171.
3. Строганов В.А. Как образовались полезные ископаемые? / В.А. Строганов // Вестник Российской академии наук. – 1998. – Т. 68. – № 12. – С. 1081–1085.
4. Беленицкая Г.А. Мертвое море – очаг рассольно-соляной разгрузки недр / Г.А. Беленицкая. – СПб.: СПбГУ, 2013. – 111 с.
5. Беленицкая Г.А. Соли и нефтиды: глобальные пространственные и кинетические взаимосвязи / Г.А. Беленицкая // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 97–112.
6. Беленицкая Г.А. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз (на примере бассейна Мексиканского залива) / Г.А. Беленицкая // Пространство и время. – 2012. – № 3 (9). – С. 193–207.
7. Шипилов Э.В. Соляная тектоника в окраинно-континентальных эвапоритовых бассейнах Арктики / Э.В. Шипилов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. – № 15. – С. 401–404.
8. Ступакова А.В. Нефтегазоносные бассейны российской Арктики / А.В. Ступакова, С.И. Бордунов, Р.С. Сауткин и др. // Геология нефти и газа. – 2013. – № 3. – С. 30–47.

A new method for predicting saliferous series in Eastern Siberia

S.B. Korotkov^{1*}, S.M. Karnaukhov¹, A.V. Stupakova², A.A. Suslova², R.S. Sautkin², A.V. Korzun²

¹ Innovative Oil and Gas Technologies (IOGT), Est. 36, Bld. 2, Obruchevea street, Moscow, 107014, Russian Federation

² Lomonosov Moscow state University, Bld. 1, Leninskiye gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russian Federation

* E-mail: s.korotkov@iogt.ru

Abstract. This article reveals a new method aimed at predicting zones of possible saliferous series distribution and saline tectonics using a complex of geophysical, hydrological and oceanographic data.

A unique salt basin at Siberian platform may have an extension in the waters of Laptev and East Siberian seas. In the absence of drilled wells, one can examine the possible presence of salt formations in a section by the indirect indicators. The authors suggest a new way, which involves studying variations of the marine water composition as an indicator of vertical ascendant unloading of highly mineralized juvenile waters. The supra-bottom brine lakes connected with the abyssal thermal fluids are known to be presented in the Gulf of Mexico, the Red and Dead seas, and in other places of the World Ocean. These lakes are described in few foreign and domestic publications.

In 2018–2019, while analyzing the oceanographic maps of the Russian Arctic seas, the authors concluded that the discovered abnormalities of marine water compositions could not be explained only with the influence of rivers and currents. It was noticed that these abnormalities related to the particular tectonic zones and features of geological structure, which were recorded in the seismic profiles. It was concluded that the spots of unloading of the highly mineralized juvenile waters may exist, and it could be a prognostic criterion of halogen formation presence within the section.

A rapidly developing analytic base enables detection of nano concentrations of the dissolved components, their isotopes, and lanthanides. Variations of compositions of the stable isotopes (²H, ¹⁸O, ³⁷Cl/³⁵Cl, ⁸¹Br/⁷⁹Br и ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) indicate the genetic criteria of evolution of the solutions. Tracing of the ²³⁴U and ²³⁸U isotopes in water, which has been impossible earlier due to their low concentrations, gives opportunity to calculate the age of subsoil waters.

Constant cheapening and simplification of sample tests make possible wide application of this method in geological prospecting. Together with other survey techniques, this procedure will decrease risks and costs of deep well constructing at initiatory stages of offshore hydrocarbon development in Arctic.

Keywords: method, forecasting, saliferous series, Arctic continental shelf, salinity flexibility, supra-bottom water, gas, oil.

References

1. STUPAKOVA, A.V., A.A. SUSLOVA, R.S. SAUTKIN, et al. Outlooks for discovery of new fields within the framework of Arctic continental shelf [Perspektivy otkrytiya novykh mestorozhdeniy v predelakh arkticheskogo shelfa]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2016, no. 4 (28): Actual issues in research of bedded hydrocarbon systems, pp. 154–164. ISSN 2306-8949. (Russ.).
2. FRANCHUK, A.A., S.B. KOROTKOV, Ye.V. SEMENOVA. Geological-geophysical characteristics of the salt-bearing fluid traps at Siberian Platform [Geologo-geofizicheskiye kharakteristiki solesoderzhashchikh fluidouporov Sibirskoy platformy]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2017, no. 3 (31): Issues for resource provision of gas-extractive regions of Russia, pp. 162–171. ISSN 2306-9849. (Russ.).
3. STROGANOV, V.A. How has the mineral wealth generated? [Kak obrazovalis poleznyye iskopayemye?]. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*. 1998, vol. 68, no. 12, pp. 1081–1085. ISSN 0869-5873. (Russ.).
4. BELENITSKAYA, G.A. *Dead Sea as a focus of the brinish-saline unloading of subsoil* [Mertvoye more – ochag rassolno-solyanoy razgruzki nedr]. St. Petersburg: St. Petersburg University, 2013. (Russ.).
5. BELENITSKAYA, G.A. Salts and naphtides: global spatial and kinetic links [Soli i naftidy: globalnyye prostranstvennyye i kineticheskiye vzaimosvyazi]. *Regionalnaya Geologiya i Metallogeniya*. 2014, no. 59, pp. 97–112. ISSN 0869-7892. (Russ.).
6. BELENITSKAYA, G.A. Natural salt-naphtide knots as the global centers of hopes and threats (a case of the Gulf of Mexico basin) [Prirodnyye solyano-naftidnyye uzly – globalnyye tsenry nadezhd i ugroz (na primere basseyna Meksikanskogo zaliva)] [online]. *Prostranstvo i Vremya*. 2012, no. 3 (9), pp. 193–207. ISSN 2226-7271. (Russ.).
7. SHIPILOV, E.V. Halokinesis in the pericontinental evaporitic Arctic basins [Solyanaya tektonika v okrainno-kontinentalnykh evaporitovykh basseynakh Arktiki]. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*. 2018, no. 15, pp. 401–404. ISSN 2074-2479. (Russ.).
8. STUPAKOVA, A.V., S.I. BORDUNOV, R.S. SAUTKIN, et al. Oil-gas-bearing basins of Russian Arctic [Neftegazonosnyye basseyny rossiyskoy Arktiki]. *Geologiya Nefti i Gaza*. 2013, no. 3, pp. 30–47. ISSN 0016-7894. (Russ.).