Научная статья УДК 550.41+551.24+553.061 https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-382-396



Геолого-геофизические исследования российской Арктики для поисков новых нефтегазовых регионов

Андрей Леонидович Харитонов^а

^аИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

Резюме. Российские арктические и субарктические регионы, по мнению многих специалистов, проводивших там исследования, должны быть богаты различными полезными ископаемыми, такими как, например, золото, олово, уголь, кимберлиты и особенно нефть и газ. Цель данной работы заключается в том, чтобы показать возможности региональных геолого-геофизических (аэрокосмических) методов исследования тектонических и морфологических особенностей строения недр Арктического региона, позволяющих провести региональное изучение потенциальных ресурсов нефти и газа как в шельфовых зонах Арктики, так и в горных или болотистых субарктических регионах Восточной Сибири, труднодоступных для некоторых других методов геологоразведки (например, сейсморазведки). В настоящей статье представлены результаты проделанной работы, которые могут позволить в совокупности с возможностями других геолого-геофизических методов проводить более качественные аэрокосмические исследования тектонического строения Арктического региона. В частности, в статье представлена блок-схема пакета компьютерных программ, используемых для математической обработки и геолого-геофизической интерпретации аэрокосмических измерений, проводимых на территории Арктики и Субарктики. Полученные результаты относительно морфологических (концентрических) структур центрального типа, образованных в результате возникновения палеомантийных плюмов, сопоставлены с независимыми данными геолого-геофизических разрезов земной коры, построенных в зонах расположения этих структур. Проведено сравнение полученных данных по нефтегазоперспективности некоторых регионов Арктики и Субарктики с результатами прогнозов других исследователей и организаций.

Ключевые слова: региональное тектоническое строение, земная кора, Арктика, Субарктика, потенциальная нефтегазоносность

Для цитирования: Харитонов А. Л. Геолого-геофизические исследования российской Арктики для поисков новых нефтегазовых регионов // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 382–396. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-382-396.

Original article

Geologic and geophysical exploration of the Russian Arctic in search for new oil and gas regions

Andrey L. Kharitonov^a

^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Many specialists who studied Russian Arctic and subarctic regions consider that the latter should be rich in various minerals, for example, gold, tin, coal, kimberlites and, especially in oil and gas. The purpose of the article is to show the potential of regional geological and geophysical (remote sensing) methods for the study of tectonic and morphological features of the structure of the Arctic region subsoil allowing to conduct a regional study of potential resources of oil and gas in the Arctic shelf areas as well as in the mountainous or swampy Subarctic regions of Eastern Siberia inaccessible for other exploration methods (for example, seismic surveying). This article presents the results of the conducted scientific work, which together with other geological and geophysical methods will make it possible to carry out better aerospace studies of the tectonic structure of the Arctic region. In particular, the article introduces a block diagram of a computer software package for mathematical processing and the geological and geophysical interpretation of remote sensing data obtained as a result of measurements over the Arctic regions. The findings obtained on morphological (concentric) structures of the central type formed as a result of the occurrence of paleo-mantle plumes are compared with

© Харитонов А. Л., 2021

independent data on geological and geophysical sections of the earth's crust constructed in the zones where these structures are located. The obtained data on the oil and gas potential of some regions of the Arctic and Subarctic are compared with the results of forecasts made by other researchers and organizations.

Keywords: regional tectonic structure, earth crust, the Arctic, the Subarctic, oil and gas potential

For citation: Kharitonov A. L. Geologic and geophysical exploration of the Russian Arctic in search for new oil and gas regions. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):382-396. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-382-396.

Введение

В настоящее время очень важно привлечь внимание крупных геолого-разведочных организаций и нефтегазовых компаний Российской Федерации к возможностям отечественной науки для проведения региональных геолого-геофизических исследований недр Арктики и Субарктики, позволяющих изучить тектонические особенности земной коры и мантии в труднодоступных для других геофизических методов геологоразведки регионах Арктики. Применение спутниковых методов дистанционного зондирования Земли, аэромагнитных и других аэрокосмических геофизических методов может дать возможность выделить наиболее перспективные нефтегазовые регионы российской Арктики и спланировать систему проведения дальнейших детальных геолого-геофизических работ в этом очень сложном по геолого-тектоническому строению регионе. В качестве геолого-геофизических методов исследования предлагается использовать накопленный опыт российских ученых по математической обработке и геофизической интерпретации результатов аэрокосмических съемок¹ [1–8] для изучения глубинного строения недр Арктического региона и геолого-геофизического прогнозирования нефтеи газоперспективных областей на основе имеющихся материалов спутниковых съемок по всей территории Арктического региона.

По мнению известных исследователей, таких как Б. М. Валяев [9], В. Ю. Визе [10], И. С. Грамберг [11], А. М. Яншин [12], С. В. Обручев [13], Р. Б. Сейфуль-Мулюков [14], В. Л. Сывороткин [15], А. И. Тимурзиев [16] и многие другие, Арктический регион является очень перспективным для поисков и разведки месторождений различных полезных ископаемых (например, нефти и газа, золота, кимберлитов). Если анализировать впадину Арктического региона с точки зрения наиболее актуальных в настоящее время для всего мирового сообщества углеводородных ресурсов, то стоит отметить, что эту территорию вместе с акваторией Северного Ледовитого океана часто называют Арктическим нефтегазовым бассейном, включающим в качестве составных частей не только морские шельфовые зоны, но и субарктические регионы Европы и Восточной Сибири, в которых уже открыто значительное количество месторождений жидких и газообразных углеводородов [9, 16]. Тем не менее до настоящего времени региональных геолого-геофизических исследований в шельфовых зонах Северного Ледовитого океана, в северных районах Восточной Сибири и Дальнего Востока было явно недостаточно для успешного решения задач по глубинному изучению и анализу перспективности восточных регионов российской Арктики [16], а также для определения оптимальной постановки детальных работ по поискам и разведке различных месторождений углеводородов (нефти, газа).

Геолого-геофизические исследования недр Северного Ледовитого океана в разное время проводились различными российскими научными² [10, 17] и многими другими организациями с помощью дрейфующих полярных станций «Северный полюс», расположенных на льдинах и вдоль одиночных арктических геотраверсов атомных ледоколов «Арктика», а также с помощью полярной авиации вдоль

¹ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

² Каминский В. Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна (в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. СПб., 2009. 245 с.

сети параллельных профилей (рис. 1). К сожалению, даже самые мощные и лучшие в мире отечественные ледокольные суда с атомными двигателями и полярная авиация могут относительно свободно выполнять геофизические измерения в пределах акватории Северного Ледовитого океана лишь в осенне-летний сезон и лишь в благоприятные по погодно-геофизическим (солнечная радиация из-за истощения озонового слоя) [15] и температурным условиям периоды, когда ледовая обстановка позволяет проводить морские геолого-геофизические исследования.

Материалы и методы исследования

В современных условиях, когда имеются определенные экономические трудности и сложности с поставкой импортного оборудования для российских геолого-разведочных и нефтедобывающих компаний [16], самыми оперативными и относительно недорогими отечественными геолого-геофизическими методами поисков и разведки крупных месторождений углеводородов на территории российского сектора Арктики могут быть аэрокосмические методы геофизических исследований.



Рис. 1. Схема проводимых геолого-геофизических исследований на акватории Северного Ледовитого океана в российском секторе Арктического региона³ Коричневыми кривыми обозначены исследования, проведенные с помощью научных станций на дрейфующих льдах «Северный полюс». Красными жирными линиями выделены геотраверсы ледокола «Арктика». Оранжевыми, зелеными, лиловыми линиями показаны маршруты аэромагнитных съемок в пределах Северного Ледовитого океана Fig. 1. Diagram of conducted geological and geophysical studies in the water area

of the Arctic Ocean in the Russian sector of the Arctic region³

Brown curves indicate researches carried out on the basis of the scientific stations on drifting ice "North Pole". Bold red lines indicate geotraverses of the icebreaker "Arktika". Orange, green, purple lines show aeromagnetic survey routes within the Arctic Ocean

³ Каминский В. Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна (в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. СПб., 2009. 245 с.

С их помощью можно проводить, например, выделение линейных региональных магнитных аномалий (магнитных линеаментов) и связанных с ними крупных тектонических разломов⁴. Только спутниковые данные (данные дистанционного зондирования Земли⁵, магнитные [6-8, 18] и геотермические измерения⁶) могут позволить осуществлять бесперебойные всесезонные длительные повторные измерения (в течение нескольких лет) значений высоты рельефа поверхности Земли, аномалий теплового потока, а также всех ортогональных (*H*, *D*, *Z*) составляющих геомагнитного поля [3-5], которые можно использовать для изучения глубинного тектонического и геодинамического строения земной коры и мантии этих очень перспективных, но труднодоступных для наземных геолого-геофизических съемок арктических и субарктических районов Российской Федерации со сложным рельефом земной поверхности и плохими погодно-климатическими условиями.

Для математической обработки и геологогеофизической интерпретации аэрокосмических данных была разработана система компьютерных программ, включающая различные современные спектральные [3, 5, 7, 19], корреляционные [6, 8] и другие методы анализа [4] измеренных цифровых геомагнитных данных, позволяющие исключать ошибки измерений и разделять измеренное поле на ортогональные составляющие, связанные с различными физическими слоями Земли (рис. 2).

В основном были использованы данные работающих на орбите Земли низкоорбитальных космических аппаратов (MAGSAT [18], CHAMP) [5], измеряющих значения модуля *T* и ортогональных компонент *X*, *Y*, *Z* вектора геомагнитного поля над всей поверхностью Арктического региона и в частности над труднодоступной для других видов геолого-геофизических исследований акваторией Северного Ледовитого океана.

Результаты исследования и их обсуждение

Статистические данные о расположении месторождений нефти и газа по всей поверхности Земли [10] показывают, что большинство месторождений газообразных и жидких углеводородов (газ, газоконденсат, нефть) сосредоточено в окрестностях глубинных разломов, связанных с палеорифтовыми [16], палеосубдукционными (надвиговыми) [16, 20], палеоплюм-тектоническими [1, 2] зонами. Поэтому автор данной статьи придает такое большое значение определению местоположения тектонических разломов, связанных с палеомантийными плюм-тектоническими структурами [2], а также связанных с ними месторождений нефти и газа на территории российской Арктики.

На рис. 3 наблюдается наличие множества (39-49) морфологических структур центрального типа (МСЦТ) разных пространственных размеров, выделенных по данным дистанционного зондирования Земли⁷ на территории восточной части Российской Федерации (Восточно-Сибирский, Якутский, Чукотский регионы). В том числе в интересующих нас районах шельфовых зон восточной Арктики по разным геолого-геофизическим (геотермальным, морфоструктурным и другим) данным автором было выделено две достаточно крупные почти кольцевые МСЦТ (39 и 45) диаметром более 500 км, простирающиеся примерно от 154-го до 174-го градуса восточной долготы, одна из которых (Северо-Чукотская МСЦТ (39)) расположена на берегу Северного Ледовитого океана с центром в районе острова Врангеля, а другая (Восточно-Сибирская МСЦТ (45)) – на шельфе, севернее

⁴ Схема зон глубинных разломов территории СССР (по геофизическим данным). М-б 1:10000000 / сост. Е. М. Ананьева [и др.]; ред. Д. М. Мильштейн. М.: Изд-во Мингео СССР, 1979. 1 л.

⁵ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

⁶ Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. М-б 1:10000000 / гл. ред. Я. Б. Смирнов. М.: Изд-во ГУГК, 1980. 1 л.

⁷ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.



Рис. 2. Блок-схема пакета компьютерных программ для математической обработки и геолого-геофизической интерпретации аэрокосмических геомагнитных измерений [19]: 1 – измеренное магнитное поле: 2 – магнитное поле Т-и Х-, Ү-, Z-компонент, измеренных на профилях в одном направлении (восходящие витки): 3 – магнитное поле Т-и Х-. Ү-. Х-компонент, измеренных на профилях в противоположном направлении (нисходящие витки): 4 – программа выявления и исключения магнитовозмущенных витков искусственного спутника Земли (компьютерная программа «Меос»); 5 – программа расчета и исключения нормального магнитного поля (компьютерная программа «Синт»): 6 - программа расчета и исключения магнитного поля, генерируемого магнитосферным кольцевым током (компьютерная программа «Колток»); 7 – программа расчета и исключения магнитного поля, связанного с ионосферой (компьютерная программа «Ионтренд»); 8 – программа перехода от неравномерной сети измерений магнитного поля вдоль профилей к равномерной сети измерений по пространству (компьютерная программа «Интерполяция»); 9 – программа построения карт аномального магнитного поля (компьютерная программа «Карта»); 10 – программа определения геометрической формы источника аномального магнитного поля (компьютерная программа «Форма»); 11 – программа расчета расстояния до источника аномального магнитного поля (компьютерная программа «Глубина»): 12 – программа определения магнитных характеристик среды (компьютерная программа «Намагниченность»)

Fig. 2. Block diagram of the software package for mathematical processing and geological and geophysical interpretation of remote geomagnetic sensing [19]:

1 – measured magnetic field; 2 – magnetic field of T- and X-, Y-, Z-components measured on profiles in one direction (ascending turns); 3 – magnetic field of T- and X-, Y-, Z-components measured on profiles in the opposite direction (descending turns); 4 – program for detection and elimination of magnetically disturbed orbits of an artificial Earth satellite (Meos computer program); 5 – program for calculation and elimination of the normal magnetic field (Sint computer program); 6 – program for calculation and elimination of the magnetic field generated by the magnetospheric ring current (Koltok computer program); 7 – program for calculation and elimination of the magnetic field associated with the ionosphere (lontrend computer program); 8 – transition program from an uneven measurement network of the magnetic field along the profiles to a uniform measurement network in space (Interpolation computer program); 9 – program for building anomalous magnetic field maps (Karta (map) computer program); 10 – program for determining the geometric shape of the source of anomalous magnetic field (Forma (form) computer program); 11 – program for calculating the distance to the source of anomalous magnetic field (Glubina (depth) computer program); 12 – program for determining magnetic characteristics of the medium (Namagnichennost (magnetization) computer program)

Медвежьих островов. На рис. 3 также выделены и другие «дочерние» МСЦТ меньшего диаметра (Шмидтовская МСЦТ (39а), Анадырская МСЦТ (39b), Колючинская МСЦТ (39с)), расположенные на берегу Анадырского залива, а также Колючинской губы. На этой карте имеются и крупные субарктические континентальные МСЦТ (Омолонская (43), Среднеянская (44), Устьнерская (47)). Известно, что большинство МСЦТ образовались в доархейские

www.nznj.ru

(нуклеарные) периоды эволюционного преобразования Земли [1]. Глубинное строение всех выделенных на представленной карте МСЦТ, уходящих своими «корнями» в мантию, подтверждается данными расчетов [2]. В соответствии с работами [2, 9] такие глубокопогруженные структуры относят к категории палеомантийных термальных плюмов (диапиров). Кроме того, на рис. 3 можно видеть фрагменты реологической сети диагональных к географическим координатам региональных тектонических разломов земной коры, секущих МСЦТ. Существует мнение, что эти тектонические разломы возникли в постархейские тектонические периоды в результате постепенного преобразования субвертикальных (нуклеарных) эндогенных процессов [1] в субгоризонтальные геодинамические процессы, характерные для глобальной тектоники литосферных плит Протерозойского, Палеозойского, Мезозойского геохронологических периодов [21]. Поэтому правильные концентрические формы некоторых МСЦТ за счет тектонических напряжений и подвижек, возникавших на разломных границах блоков палео-литосферных плит этих регионов, были частично деформированы и разбиты на отдельные сектора пост-архейскими глубинными тектоническими разломами (примером может служить Устьнерская МСЦТ (47)).



Рис. 3. Фрагмент карты морфологических структур центрального типа,
расположенных на территории Восточной Сибири:39 – Северо-Чукотская; 39а – Шмидтовская; 39b – Анадырская; 39с – Колючинская; 43 – Омолонская;
43a – Аонская; 44 – Среднеянская; 45 – Восточно-Сибирская; 46а – Алазейская; 47 – Устьнерская;
47b – Зыряновская; 48 – Олюторская; 49 – Нижне-Колымская8
Fig. 3. Fragment of a map of morphological structures
of the central type located in Eastern Siberia:
39 – North Chukotka; 39a – Shmidtovskaya; 39b – Anadyr; 39s – Kolyuchinskaya; 43 – Omolonskaya;
43a – Aonian; 44 – Sredneyanskaya; 45 – East Siberian; 46a – Alazeyskaya; 47 – Ustnerskaya;
47b – Zyryanovskaya; 48 – Olyutorskaya; 49 – Nizhne-Kolymskaya⁸

⁸ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

Часть показанных на рис. 3 МСЦТ (39–49) имеет глубинные мантийные «корни». Анализ ранее рассмотренных многочисленных МСЦТ [1, 9] показывает, что наиболее крупные месторождения нефти обычно сосредоточены в периферических (бортовых) зонах, а месторождения газа - в пределах центральных купольных зон, расположенных над «трубами» дегазации мантии этих структур. Из анализа рис. 3 следует, что самые крупные газовые месторождения могут быть связаны с так называемыми «трубами» дегазации [9] (обычно расположенными в центральной части) основных МСЦТ (Баренцевоморской (35), Южно-Карской (36) и Печорской (37)), а нефтяные месторождения – с периферическими (бортовыми) зонами или периферическими дочерними МСЦТ (Шмидтовской (39а), Усть-Индигирской (45b), Островной (45c), Янской (45d), Алазейской (46a), Хатангской (11c)).

Другим подтверждением нефтегазовой перспективности территорий, связанных с МСЦТ Восточно-Сибирского региона, может быть один из глубинных геолого-геофизических разрезов, на котором можно видеть наличие Среднеянской куполообразной структуры, образованной осадочными породами этого нефтегазоносного бассейна, связанного с Среднеянским палеомантийным плюмом, расположенным в пределах Верхоянского региона (рис. 4).

Исследованиями установлено, что Среднеянская куполообразная МСЦТ (см. рис. 4) образована одноименным палеомантийным плюмом, подобным тем кольцевым морфологическим структурам, которые были выделены на территории Западной Сибири как по наземным геолого-геофизическим (сейсморазведочным, гравитационным) данным [2, 9], так и с учетом данных дистанционного зондирования Земли⁹ [1]. Другой геолого-геофизический разрез, пересекающий территорию Олондинской МСЦТ, построенный по данным аномального магнитного поля (рис. 5, *a*), изображен на рис. 5, *b*.

На обоих геолого-геофизических разрезах (см. рис. 4 и 5) можно видеть наличие куполообразных (концентрических) МСЦТ, выделенных по дистанционным и геолого-геофизическим данным¹⁰, подобных другим концентрическим морфологическим структурам Арктики Субарктики (например, Южно-Карской И МСЦТ), в которых уже найдены многочисленные месторождения нефти и газа [9]. Опираясь на все вышеизложенные элементы методики регионального прогноза нефтегазовой перспективности регионов [9, 14, 19], на геоморфологические (см. рис. 4)¹¹ [1] и другие геолого-геофизические данные (см. рис. 5)¹² о расположении и глубинном строении МСЦТ Верхоянского региона, образованных одноименными палеомантийными плюмами, можно говорить о перспективности на нефть и газ их бортовых зон.

Важным статистическим параметром, по которому оценивают нефтегазоперспективность той или иной территории [22], является большое количество «сквозных» глубинных тектонических разломов, пересекающих всю земную кору, приходящихся на один квадратный километр исследуемого региона. Чтобы являться нефтегазоперспективными, тектонические разломы должны быть также перекрыты достаточно мощным слоем осадочных пород с глинистыми прослойками. Это необходимо для того, чтобы в результате дегазации мантии углеводородные геофлюиды, мигрирующие вверх по микро-поровому пространству вдоль глубинных тектонических разломов, задерживались в структурных и литологических «ловушках» осадочного слоя земной коры [14]. По спутниковым геомагнит-

⁹ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

¹⁰ Карта геотермического режима земной коры территории СССР. М-б 1:10000000 / сост. У. И. Моисеенко [и др.]; ред. А. А. Смыслов. М.: Аэрогеология, 1978. 1 л.

¹¹ Соловьев В. В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа: объяснительная записка к Карте морфоструктур центрального типа территории СССР масштаба 1:10000000. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 111 с.

¹² Карта геотермического режима земной коры территории СССР. М-б 1:10000000 / сост. У. И. Моисеенко [и др.]; ред. А. А. Смыслов. М.: Аэрогеология, 1978. 1 л.



Харитонов А. Л. Геолого-геофизические исследования российской Арктики... Kharitonov A. L. Geologic and geophysical exploration of the Russian Arctic in search...



Рис. 4. Результаты анализа структурных формаций Верхоянского региона по данным дистанционного зондирования и наземным геолого-геофизическим данным: а – структурная схема локализации магматических формаций Верхоянского региона: 1 – глубинные разломы коро-мантийного глубинного заложения; 2 – зоны коллизии между Сибирской платформой и Верхоянским геоблоком по геолого-геофизическим и дистанционным данным; 3 – надвиги и шарьяжи; 4 – морфологические структуры центрального типа; 5 – шовная зона, ограничивающая Колымский микроконтинент; 6 – трансрегиональные тектонические разломы сквозного типа; 7 – осевые зоны повышенной магматической проницаемости; 8 – рифтогенные неоген-четвертичные формации; 9 – область повышенных значений геотермического поля; 10 – область высоких значений геотермического поля, совпадающая с областью позднемезозойской гранитизации; 11 – тектонические разломы с бортовым смещением; 12 – положение профиля, вдоль которого построен схематический глубинный геолого-геофизический разрез; А – Алазейская морфологическая структура центрального типа, образовавшаяся на протяжении двух геодинамических режимов: инициального и островодужного b – результаты корреляционного анализа данных измеренных геофизических полей: dQ – график значений теплового потока вдоль профиля исследований; dg – график значений аномального гравитационного поля вдоль профиля исследований; dT – график значений модуля аномального магнитного поля вдоль профиля исследований; r_{xy} – коэффициент взаимной корреляции значений двух разных геофизических полей, рассчитанный вдоль профиля исследований

с – глубинный геолого-геофизический разрез земной коры, построенный по комплексу геолого-геофизических данных¹³ по исследуемому региональному профилю, пересекающему территорию Верхоянского региона вдоль 67-го градуса северной широты; геологические структуры, пересекаемые глубинным разрезом:
I – Сибирская платформа; II – Верхоянский прогиб; III – Верхоянское поднятие; IV – Среднеянский батолит; V – поднятие Черского; VI – Момский рифт; VII – западный борт Омолонского массива;
1 – формации осадочного слоя земной коры; 2 – формации грубообломочных пород осадочного слоя земной коры; 3 – формации осадочного слоя земной коры; 6 – слой консолидированной литосферы; 7 – нижняя граница осадочного слоя земной коры; 6 – слой консолидированной литосферы; 7 – нижняя граница осадочного слоя земной коры; 1 – дормации пространственного простирания блоков гранитизированных комплексов земной коры; 9 – локальные внутрикоровые тектонические разломы; 10 – региональные внутрикоровые тектонические разломы; 11 – зоны повышенной проницаемости земной коры

Fig. 4. Analysis results of structural formations of the Verkhoyansk region according to remote sensing data and ground geological and geophysical data:

a – structural diagram of magmatic formation locations in the Verkhoyansk region:
1 – deep crustal-mantle faults; 2 – collision zones between the Siberian platform and the Verkhoyansk geoblock based on geological, geophysical and remote sensing data; 3 – thrusts and overthrust foldings; 4 – morphological structures of the central type; 5 – suture zone framing Kolyma microcontinent; 6 – trans-regional tectonic faults of the through type; 7 – axial zones of increased magmatic permeability; 8 – riftogenic Neogene-Quaternary formations;

¹³ Карта геотермического режима земной коры территории СССР. М-б 1:10000000 / сост. У. И. Моисеенко [и др.]; ред. А. А. Смыслов. М.: Аэрогеология, 1978. 1 л.

9 – area of increased values of the geothermal field; 10 – area of high values of the geothermal field coinciding with the area of late Mesozoic granitization; 11 – tectonic faults with a side shift; 12 – location of a profile along which a schematic deep geological and geophysical section is built; A – Alazeyskaya morphological structure of the central type formed during two geodynamic regimes: initial and island arc b – correlation analysis results of the data of measured geophysical fields:

dQ - graph of heat flux values along the survey profile; dg - graph of the values of anomalous gravitational field along the survey profile; dT - graph of the modulus values of the anomalous magnetic field along the survey profile; r_{xy} - cross-correlation coefficient of values of two different geophysical fields calculated along the survey profile c - deep geological and geophysical section of the earth's crust built on the basis of integrated geological and geophysical data¹³ by the studied regional profile crossing the territory of the Verkhoyansk region along the 67th degree north latitude; geological structures intersected by a deep section:

I – Siberian platform; II – Verkhoyansk trough; III – Verkhoyansk uplift; IV – Sredneyansky batholith; V – Chersky uplift; VI – Momsky rift; VII – western side of the Omolonsky massif;

1 – formations of the sedimentary layer of the earth's crust; 2 – formations of coarse clastic rocks of the sedimentary layer of the earth's crust; 3 – Baikalid formation complexes; 4 – Baikalid formation complexes with granitization; 5 – formations of the "basalt" layer of the earth's crust; 6 – layer of the consolidated lithosphere; 7 – lower border of the sedimentary layer of the earth's crust; 8 – direction of spatial strike of granitized blocks of the earth's crust complexes; 9 – local intracrustal tectonic faults; 10 – regional intracrustal tectonic faults;





Рис. 5. Измеренное магнитное поле и геолого-геофизический (геомагнитный) разрез глубинного строения Олондинской куполообразной морфологической структуры центрального типа, сформированного одноименной концентрической палеомантийной плюм-тектонической структурой: а – измеренные значения модуля dT аномального магнитного поля;

b – результаты расчета и построения глубинных границ геолого-геофизического (геомагнитного) разреза земной коры:

1 – слой грубообломочных формаций; 2 – формации грубообломочных пород осадочного слоя земной коры;

3 – слой гранитоидных формаций земной коры; 4 – формации «базальтового» слоя земной коры;

I — Ченченский тектонический разлом; II — Верхнечарский тектонический разлом;

III — Чароудинский тектонический разлом

Fig. 5. Measured magnetic field and geological and geophysical (geomagnetic) section of the deep structure of the Olondinsky dome-shaped morphological structure of the central type formed by the concentric paleomantle plume-tectonic structure of the same name:

a – measured values of the modulus dT of the anomalous magnetic field;

b - calculation and construction results of deep boundaries of geological

and geophysical (geomagnetic) section of the earth's crust:

1 - a layer of coarse clastic formations; 2 - formations of coarse clastic rocks of the sedimentary layer of the earth's

crust; 3 – layer of granitoid formations of the earth's crust; 4 – formations of the "basalt" layer of the earth's crust;

I – Chenchensky tectonic fault; II – Verkhnecharsky tectonic fault; III – Charoudinsky tectonic fault

ным и морфоструктурным данным было выделено около 30 крупных глубинных тектонических разломных зон в пределах акватории Северного Ледовитого океана. На рис. 6 показаны цепочки уже разведанных месторождений нефти и газа или разведанных, но пока не разбуренных перспективных нефтегазовых структур, которые самым непосредственным образом связаны с сетью ортогональных тектонических нарушений, выделенных по спутниковым геомагнитным и морфоструктурным данным в пределах Баренцева, Печорского, Карского морей и полуострова Ямал. В пределах Южно-Карской, Баренцевоморской, Печорской МСЦТ особенно перспективны на нефть и газ антиклинальные литологические структуры (ловушки углеводородов), расположенные в узлах пересечений глубинных тектонических разломов, в зонах дробления пород с хорошими коллекторскими свойствами (см. рис. 6).



Рис. 6. Схема расположения взаимно ортогональной реологической сети тектонических разломов (пересекающиеся линии) и морфологических структур центрального типа (окружности) в пределах Карского, Баренцева, Печорского морей и связанных с ними месторождений углеводородов (красные – газовые месторождения, черные – нефтяные месторождения, желтые – выявленные структуры, голубые – подготовленные к бурению структуры): I – месторождения: 1 – нефтегазовые; 2 – газонефтяные; 3 – газовые; 4 – газоконденсатные; 5 - нефтегазоконденсатные; 6 - открытые; 7 - ОАО «Газпром» II – локальные структуры: 1 – выявленные; 2 – готовые к бурению; 3 – выведенные из бурения; 4 – аномалии типа «Риф»; 5 – аномалии типа «Залежь»; 6 – предполагаемые ловушки неантиклинального типа Некоторые наиболее известные тектонические разломы: № 1 – Кольский, № 2 – Обско-Ямальский Нефтегазоперспективные морфологические структуры центрального типа: 35 – Баренцевоморская; 36 – Южно-Карская; 36а – Ленинградская; 36b – Ямальская; 36с – Гыданская; 36d – Обская; 37 – Печорская Fig. 6. Location diagram of the mutually orthogonal rheological network of tectonic faults (intersecting lines) and morphological structures of the central type (circles) within the Kara, Barents, Pechora seas and associated with them hydrocarbon deposits (red - gas fields, black - oil fields, yellow - identified structures, blue - structures prepared for drilling): I - fields: 1 - oil and gas; 2 - gas and oil; 3 - gas; 4 - gas condensate;5 - oil and gas condensate; 6 - prospected; 7 - OJSC Gazprom II – local structures: 1 – identified; 2 – ready for drilling; 3 – removed from drilling; 4 – Reef-type anomalies; 5 – Deposit-type anomalies; 6 – expected non-anticlinal traps Some of the best known tectonic faults: No. 1 – Kola, No. 2 – Obsko–Yamalsky

Oil and gas promising morphological structures of the central type: 35 – Barents Sea; 36 – South Kara; 36a – Leningradskaya; 36b – Yamal; 36s – Gydanskaya; 36d – Obskaya; 37 – Pechora

Выделенные автором представленной статьи по спутниковым геомагнитным [19] и морфоструктурным данным (см. рис. 6) зоны структур центрального типа (окружности) (35, 36, 36a, 36b, 36c, 36d, 37), разбитых сетью глубинных тектонических разломов на акватории Северного Ледовитого океана (пересекающиеся линии), частично (35, 36s) представленные на рис. 7, также показывают, что они образуют вокруг себя достаточно перспективные (V, VIII, X) и высокоперспективные шельфовые области Арктики (II, IV) со значительными запасами углеводородов. Таким образом, независимые оценки ресурсов углеводородов, проведенные в пределах минимальной

площади внешней границы континентального шельфа, принятые Комиссией Организации Объединенных Наций (ООН) по границам континентального шельфа, свидетельствуют о перспективности значительной части шельфовых зон Российской Федерации вдоль побережья Северного Ледовитого океана. Сделанные нами оценки перспективных зон накопления углеводородов по комплексу различных геолого-геофизических, морфоструктурных данных о расположении МСЦТ совпадают с независимыми оценками ресурсов углеводородов Комиссии ООН в пределах внешней границы континентального шельфа Российской Федерации (см. рис. 7).



Рис. 7. Карта перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Северного Ледовитого океана (с различными вариантами внешней границы континентального шельфа Российской Федерации) Цветом обозначены площади с различной степенью перспективности концентрации углеводородов; в рамках дана оценка ресурсов углеводородов в пределах минимальной площади внешней границы континентального шельфа Российской Федерации, принимаемой Комиссией Организации Объединенных Наций по границам континентального шельфа¹⁴

Автором добавлены окружности, обозначающие расположение морфологических структур центрального типа. Лиловыми окружностями обозначены зоны расположения морфологических структур центрального типа (11, 11a, 11c, 12, 35–38, 39a, 39b, 43, 45a, 45b, 45c, 45d, 46, 49), сформированных палеомантийными плюмами. Оранжевым цветом выделены высокоперспективные зоны расположения месторождений углеводородов (I, II, III, IV), которые связаны с Баренцевской (35), Северо-Карской (36n), Южно-Карской (36s), Печорской (37), Франц-Иосифовской (38) морфологическими структурами центрального типа и с зонами дробления пород вдоль глубинных тектонических разломов: № 1 – Карельский, № 2 – Обско-Ямальский. В восточной части Арктики желтым цветом аналогично выделены средне-перспективные зоны расположения месторождений углеводородов (V, VIII, X), которые связаны с бортовыми зонами Индигиро-Колымской (46), Восточно-Сибирской (45), Омолонской (43), Северо-Чукотской (39), Лаптевской (12) морфологических структур центрального типа, их дочерними кольцевыми структурами (Оленёкской (11а), Хатангской (11с), Шмидтовской (39a), Анадырской (39b), Усть-Индигирской (45b), Островной (45c), Янской (45d), Алазейской (46c)) и с пересекающими их глубинными тектоническими разломами (№ 1 – Баренцевоморский, № 2 – Обские, № 3 – Хатангский, № 4 – Оленёкский, № 5 – Ленский, № 6 – Янский, № 7 – Индигирский, № 8 – Алазейский, № 9 – Колымский и другие тектонические разломы)

¹⁴ Глубинное строение Центрального Арктического бассейна: в связи с обоснованием внешней границы континентального шельфа Российской Федерации и оценкой углеводородных ресурсов: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. СПб., 2009. 255 с.

Fig. 7. Map of oil and gas potential of sedimentary basins of the Arctic Ocean

(with different options of the outer border of the continental shelf of the Russian Federation) The color indicates the areas with varying potential of hydrocarbon concentrations; the boxes contain the assessment of hydrocarbon resources within the minimum area of the outer border of the continental shelf of the Russian Federation adopted by the United Nations Commission on the boundaries of the continental shelf¹⁴ The author has added the circles that indicate the location of morphological structures of the central type. Lilac circles indicate location zones of morphological structures of the central type (11, 11a, 11c, 12, 35–38, 39a, 39b, 43, 45a, 45b, 45c, 45d, 46, 49) formed by paleomantle plumes. Orange color indicates highly promising location areas of hydrocarbon deposits (I, II, III, IV) associated with the Barents (35), North Kara (36n), South Kara (36s), Pechora (37), Franz Josef (38) morphological structures of the central type and with rock crushing zones along deep tectonic faults: No. 1 - Karelsky, No. 2 - Obsko-Yamalsky. The yellow color in the eastern part of the Arctic similarly indicates mid-perspective location zones of hydrocarbon deposits (V, VIII, X), which are associated with the side zones of the Indigiro-Kolymskaya (46), East Siberian (45), Omolonskaya (43), North-Chukotka (39), Laptevskaya (12) morphological structures of the central type, their daughter ring structures (Olenekskaya (11a), Khatangskaya (11c), Schmidtovskaya (39a), Anadyr (39b), Ust-Indigirskaya (45b), Ostrovnoy (45c), Yanskaya (45d), Alazeyskaya (46c)) and with intersecting deep tectonic faults (No. 1 – Barents Sea, No. 2 – Obsky, No. 3 – Khatanga, No. 4 – Oleneksky, No. 5 – Lensky, No. 6 – Yansky, No. 7 – Indigirsky, No. 8 – Alazeysky, No. 9 – Kolymsky and other tectonic faults)

Заключение

На основе анализа представленных выше геолого-геофизических данных (морфоструктурных, магнитных, геотермических) можно заключить, что высоко перспективными регионами для поисков крупных нефтегазовых месторождений могут быть бортовые зоны МСЦТ и их дочерние периферийные структуры (см. рис. 7), расположенные в пределах восточной части Арктики (Восточно-Сибирское море (45b), (45c), (45d), Чукотское море (39)), а также в субарктической континентальной части Арктики, в различных районах Восточной Сибири (Анабарская (11)), Республики Саха (Якутия) (Индигиро-Колымская (46)) и Чукотского автономного округа (Анадырская (39b), Омолонская (43)), которые, в соответствии с представленными результатами [2, 9], связаны с палеомантийными плюмами. Независимые данные о ресурсах углеводородов, оцененных в пределах минимальной площади внешней границы континентального шельфа Российской Федерации, принятые Комиссией ООН по границам континентального шельфа (см. рис. 7), также показывают, что бортовые зоны МСЦТ в пределах Восточно-Сибирского и Чукотского морей являются достаточно перспективными на залежи нефти и газа (регионы выделены желтым цветом). Судя по сообщениям [9, 14, 16], углеводородные геофлюиды под действием высоких температур и давлений мигрируют к поверхностным структурным или литологическим «ловушкам» осадочного чехла по глубинным тектоническим разломам - зонам дробления и перетирания горных пород земной коры – и вследствие этого образуют зоны повышенной проницаемости. Часто эти тектонические разломы пересекают бортовые зоны глубинных морфологических структур или расположены вдоль них, поэтому здесь обычно сосредоточены месторождения углеводородов. На протяжении многих миллионов лет углеводороды концентрировались в различного вида структурных «ловушках» в приповерхностных слоях осадочного чехла, образуя значительные месторождения нефти и газа за периоды активной дегазации Земли [9, 14–16]. Эта точка зрения о миграции простейших углеводородов (C, CO₂, H₂, CH₄) из недр палеомантийных плюмов и их последующем геохимическом и термобарическом преобразовании [14] в более сложные углеводороды нефтяного ряда поддерживается многими известными российскими и зарубежными геологами и геофизиками [9, 16].

Список источников

1. Брюханов В. Н., Глуховский М. З., Ставцев А. Л. Кольцевые структуры Земли // Природа. 1977. № 10. С. 54–65.

2. Гаврилов С. В. Проникновение теплового диапира в континентальную литосферную плиту из неньютоновской верхней мантии // Физика Земли. 1994. № 7-8. С. 18–26.

3. Ротанова Н. М., Харитонов А. Л., Ченчанг Ан. Спектральный анализ магнитного поля, измеренного на спутнике МАГСАТ // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. T. 39. № 3. C. 101–107.

4. Ротанова Н. М., Головков В. П., Фрунзе А. Х., Харитонов А. Л. Анализ спутниковых измерений с помощью разложения поля на естественные ортогональные составляющие // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 4. С. 92–99.

5. Фонарев Г. А., Харитонов А. Л., Харитонова Г. П. Использование методов пространственно-временной магнитометрии для анализа магнитного поля, измеренного на спутнике «СНАМР» // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2007. № 2. С. 49–53.

6. Lugovenko V. N., Pchelkin A. V., Kharitonov A. L. Nature of the magnetic anomaly field of continents and oceans // Proceedings of the International Conference on Marine Electromagnetics. London, 1997.

7. Xu Y., An Z., Huang B., Golovkov V. P., Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Distribution of apparent magnetization for Asia // Science in China. Series D: Earth Sciences. 2000. Vol. 43. Iss. 6. P. 654–660. https://doi.org/10.1007/BF02879510.

8. Hassan G. S., Kharitonov A. L., Serkerov S. A. Principal satellite-measured three-dimensional statistical characteristics of potential fields in East Asia and their relationship to earthquake epicenters // Mapping Sciences and Remote Sensing. 2003. Vol. 39. Iss. 2. P. 105–117. https://doi.org/10.2747/0749-3878.40.2.105.

9. Валяев Б. М. Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения акад. П. Н. Кропоткина): сб. ст. / ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валяев. М.: ГЕОС, 2011. С. 10–32.

10. Визе В. Ю. История исследования советской Арктики: Баренцево и Карские моря. Архангельск: Севкрайгиз, 1935. 233 с.

11. Грамберг И. С., Сороков Д. С., Лазуркин Д. В. Задачи и направления региональных геолого-геофизических работ на нефть и газ в Арктической части Восточной Сибири // Геология нефти и газа. 1969. № 2. С. 27–31.

12. Яншин А. Л., Зятькова Л. К. Развитие и использование исследований природных явлений и ресурсов в Сибири и на Дальнем Востоке // Исследование Земли из космоса. 1980. № 1. С. 40–48.

1. Bryukhanov V. N., Glukhovskii M. Z., Stavtsev A. L. Ring structures of the Earth. *Priroda*. 1977;10:54-65. (In Russ.).

2. Gavrilov S. V. Penetration of heat diapir in the continental lithosphere plate from the non–Newtonian upper mantle. *Fizika Zemli*. 1994;7-8:18-26. (In Russ.).

3. Rotanova N. M., Kharitonov A. L., Chang A. T. Spectral analysis of the magnetic field measured onboard the MAGSAT satellite. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 1999;39(3):101-107. (In Russ.).

4. Rotanova N. M., Golovkov V. P., Frunze A. Kh., Kharitonov A. L. An analysis of satellite measurements

13. Обручев С. В. Работа Колымского геоморфологического отряда Якутской экспедиции // Известия Академии наук СССР. Серия VII. Отделение физико-математических наук. 1929. № 8. С. 749–756.

14. Сейфуль-Мулюков Р. Б. Нефть и газ: глубинная природа и ее прикладное значение. М.: Торус Пресс, 2012. 216 с.

15. Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы: монография. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.

16. Тимурзиев А. И. Миф «энергетического голода» от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта «Глубинная нефть» // Бурение и нефть. 2019. № 1. С. 12–20.

17. Трофимов И. Л., Шнеер В. С., Халезов А. А. Аномальное магнитное поле хребта Ломоносова по данным дрейфующей станции «Северный полюс-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 2. С. 275–279.

18. Langel R., Berbert J., Jennings T., Horner R. MAG-SAT data processing: a report for investigators. Greenbelt: Goddart Space Flight Center, 1981. 315 p. [Электронный pecypc]. URL: https://archive.org/details/nasa_techdoc_19820017721/page/n1/mode/2up (17.08.2021).

19. Харитонов А. Л. Методы математической обработки первичных спутниковых данных, используемые для одновременного анализа электромагнитных неоднородностей в различных геосферах Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. тез. докл. XV Всерос. открыт. конф. М., 2017. С. 65.

20. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое по распределению зон выноса мантийных углеводородов в Западной Сибири // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 36–40.

21. Новая глобальная тектоника (тектоника плит): сб. ст. / пер. с англ. К. Л. Волкович, Г. И. Денисова; ред. Л. П. Зоненшайн, А. А. Ковалев. М.: Мир, 1974. 471 с.

22. Закиров А. Ш., Харитонов А. Л. Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности Северного Устюрта // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 11. С. 1759– 1771. [Электронный ресурс]. URL: http://journal.deepoil. ru/images/stories/docs/DO-2-11-2014/5_Zakirov-Kharitonov_2-11-2014.pdf (17.08.2021).

References

using the expansion of the magnetic field into natural orthogonal components. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 1999;39(4):92-99. (In Russ.).

5. Fonarev G. A., Kharitonov A. L., Kharitonova G. P. Use of the spatial-temporary magnetic measurement methods for the analysis of the geomagnetic field, measured on the satellite "CHAMP". *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii "Uchebno-nauchnyy tsentr". Seriya: Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences.* 2007;2:49-53. (In Russ.).

6. Lugovenko V. N., Pchelkin A. V., Kharitonov A. L. Nature of the magnetic anomaly field of continents and oceans. *Proceedings of the International Conference on Marine Electromagnetics*. London; 1997.

7. Xu Y., An Z., Huang B., Golovkov V. P., Rotanova N. M., Kharitonov A. L. Distribution of apparent magnetization for Asia. Science in China. Series D: Earth Sciences. 2000;43(6):654-660. https://doi.org/10.1007/BF02879510.

8. Hassan G. S., Kharitonov A. L., Serkerov S. A. Principal satellite-measured three-dimensional statistical characteristics of potential fields in East Asia and their relationship to earthquake epicenters. *Mapping Sciences and Remote Sensing*. 2003;39(2):105-117. https://doi.org/ 10.2747/0749-3878.40.2.105.

9. Valyaev B. M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and origin of gas and oil. In: Dmitrievskii A. N., Valyaev B. M. (eds.). Degazatsiya Zemli i genezis nefte-gazovykh mestorozhdenii (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika P. N. Kropotkina) = Degassing of the Earth and genesis of oil and gas deposits (to the 100th birth anniversary of the Academician P. N. Kropotkin). Moscow: GEOS; 2011. p.10–32. (In Russ.).

10. Vize V. Yu. *History of Soviet Arctic exploration. The Barents and Kara seas*. Arkhangelsk: Sevkraigiz; 1935. 233 p. (In Russ.).

11. Gramberg I. S., Sorokov D. S., Lazurkin D. V. The tasks and directions of regional geological and geophysical works on oil and gas in the Arctic part of Eastern Siberia. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1969;2:27-31. (In Russ.).

12. Yanshin A. L., Zyat'kova L. K. Development and use of studies of natural phenomena and resources in Siberia and the Far East. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1980;1:40-48. (In Russ.).

13. Obruchev S. V. The work of the Kolyma geomorphological party of the Yakutsk expedition. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya VII. Otdelenie fiziko-matematicheskikh nauk.* 1929;8:749-756. (In Russ.).

14. Seiful'-Mulyukov R. B. *Oil and gas: inorganic abiotic nature and its applicability.* Moscow: Torus Press; 2012. 216 p. (In Russ.). 15. Syvorotkin V. L. *Deep degassing of the Earth and global natural disasters*. Moscow: Geoinformtsentr; 2002. 250 p. (In Russ.).

16. Timurziev A. I. Myth of "Power hunger" from Habbert and ways of thedecision of the global power problem on base of "Deepoil" project realization. *Burenie i neft*'. 2019;1:12-20. (In Russ.).

17. Trofimov I. L., Shneer V. S., Khalezov A. A. Anomalous magnetic field of the Lomonosov Rise according to data of the North Pole 19 drifting station. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2006;46(2):275-279. (In Russ.).

18. Langel R., Berbert J., Jennings T., Horner R. MAG-SAT data processing: a report for investigators. Greenbelt: Goddart Space Flight Center; 1981. 315 p. Available from: https://archive.org/details/nasa_techdoc_19820017721/ page/n1/mode/2up [Accessed 17th August 2021].

19. Kharitonov A. L. Mathematical methods of primary satellite data processing used for simultaneous analysis of electromagnetic heterogeneities in different geospheres of the Earth. In: Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: sbornik tezisov dokladov XV Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii = Modern problems of Earth remote sensing: collected abstracts of reports of 15th All-Russian open conference. Moscow, 2017. p.65. (In Russ.).

20. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Velocity of the subduction of the Russian platform under the Siberian one in the Paleozoic by the distribution of mantle hydro-carbon upwelling zones in Western Siberia. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2015;16(4):36-40. (In Russ.).

21. Zonenshain L. P., Kovalev A. A. *The new global tectonics (plate tectonic)*. Moscow: Mir; 1974. 471 p. (In Russ.).

22. Zakirov A. Sh., Kharitonov A. L. Deep structure and prospects of oil-and-gas content of Northern Ustyurt. *Glubinnaya neft*'. 2014;2(11):1759-1771. Available from: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-11-

2014/5_Zakirov-Kharitonov_2-11-2014.pdf [Accessed 17th August 2021]. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Харитонов Андрей Леонидович,

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории главного магнитного поля, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия, ahariton@izmiran.ru, https://orcid.org/0000-0002-0843-452X. **Andrey L. Kharitonov,** Cand. Sci. (Phys. & Math.), Leading Researcher of the Main Magnetic Field Laboratory, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ahariton@izmiran.ru, https://orcid.org/0000-0002-0843-452X.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи. The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.09.2021; одобрена после рецензирования 07.10.2021; принята к публикации 09.11.2021.

The article was submitted 02.09.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 09.11.2021.