

## Изотопно-геохимические показатели глубинности процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления

А.Н. Дмитриевский, Б.М. Валяев\*, М.В. Родкин

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: \*valyb@mail.ru

**Аннотация.** Геохимические и изотопно-геохимические показатели позволили выявить корреляцию обстановок нефтегазообразования со спецификой глубинных геодинамических процессов и углеводородной дегазации Земли. Конкретизируется оценка перспектив нефтегазоносности глубокозалегающих комплексов пород осадочного разреза и консолидированной коры (фундамента) нефтегазоносных регионов. Связь процессов массивированного нефтегенеза с зонами рециклинга вещества земной коры и верхней мантии открывает возможности разработки новых признаков высокопродуктивных зон нефтегазонакопления на основе учета данных по комплексу геохимических и геофизических данных.

**Ключевые слова:** изотопно-гелиевые отношения, углерод-гелиевые отношения, нефтегазоносные регионы, углеводородная дегазация Земли, рециклинг, обстановки, нефтегазообразование, микроэлементный состав.

**Для цитирования:** Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М., Родкин М.В. Изотопно-геохимические показатели глубинности процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art21>

Исчерпание ресурсов крупнейших нефтегазовых месторождений и длительно разрабатываемых нефтегазоносных регионов в разбуренном диапазоне глубин (до 5–6 км) очевидно. Все более актуальным становятся прогноз и поиски скоплений углеводородов на больших глубинах. Оценка условий образования скоплений углеводородов на больших глубинах (8–15 км) может быть сделана только на новой геодинамической основе. По результатам томографических исследований в энергетике образования нефтегазоносных бассейнов могут быть задействованы не только верхнемантийные, но и нижнемантийные процессы. Плюмы разогретого материала поднимаются от ядра Земли, а компенсационные опускания корового материала прослеживаются уверенно до нижней мантии [1, 2 и др.]. Масштабы переработки корового вещества (рециклинг), с учетом его вовлечения в повторные активные геодинамические процессы, возрастают многократно [3, 4 и др.]. В петрологии и рудной геологии процессы рециклинга корового вещества активно изучаются [5, 6 и др.]. В этих процессах, помимо погружения коры и ее переработки при магматических воздействиях, важное место занимает флюидно-метасоматическое преобразование коры. Наряду с геофизическими, возрастает

необходимость использования изотопно-геохимических методов и данных в специфических обстановках. К первоочередным задачам такого рода исследований относится выявление структурно-тектонических обстановок и геодинамических режимов, определяющих возможность масштабной генерации углеводородов на больших глубинах.

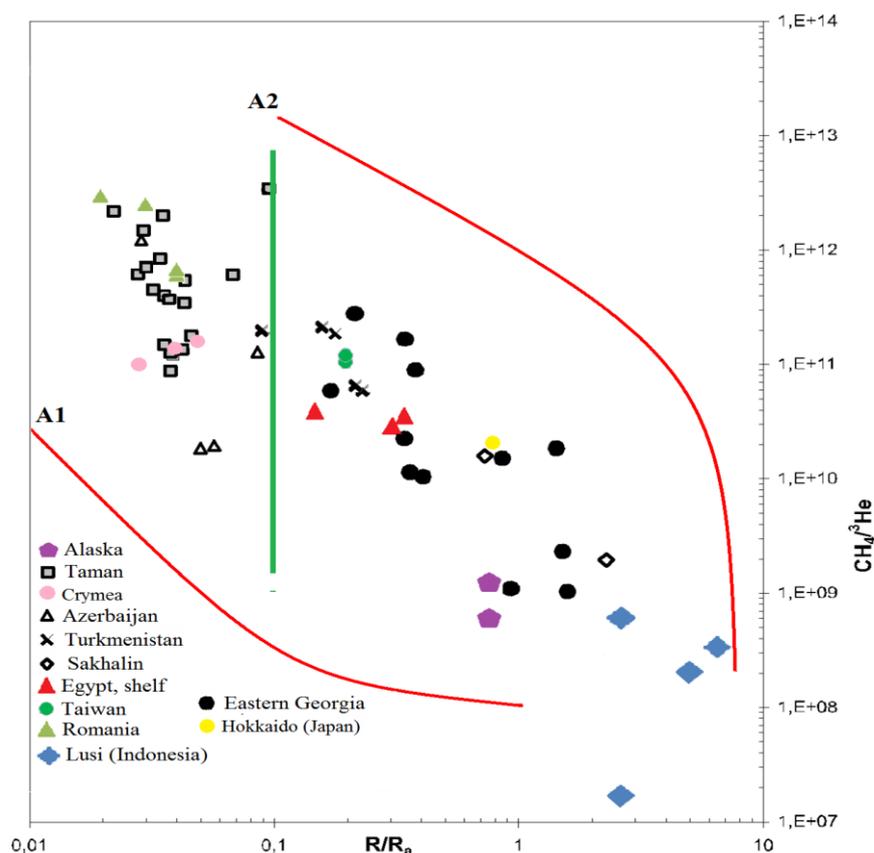
Наиболее информативными для выявления роли глубинных процессов в образовании и закономерностях распространения нефтегазовых месторождений представляются данные по изотопии гелия. До последнего времени их использование было ограниченным, во многом связанным с общепринятыми представлениями о низкотемпературном генезисе нефти и газа. На современном этапе эти представления активно пересматриваются. Разрабатываемые идеи по углеводородной дегазации Земли, полигенезу нефти и газа, восполнению нефтегазовых месторождений в процессах их углубленного познания отражают итоги такого пересмотра [7–11 и др.].

В исследованиях по изотопной геохимии гелия для глубинных флюидно-газовых систем вулканических и гидротермальных процессов главным газовым компонентом была углекислота. В нефтегазовых месторождениях и флюидах грязевых вулканов преобладал метан. Авторами было выполнено мультирегиональное обобщение и переинтерпретация данных по обоим компонентам. Наряду с построением отдельных углерод-гелиевых диаграмм впервые было проведено сопоставление двух мультирегиональных диаграмм для метана и углекислоты на единой суммарной диаграмме [12]. Близкий диапазон изменения углерод-гелиевых отношений (УГО)  $C_{CO_2}/^3He$  на суммарной диаграмме позволил сделать вывод о важной роли рециклической переработки (рециклинга) корового материала не только для углекислоты, но и для метана. При этом получило объяснение увеличение УГО на одной оси сводной диаграммы со снижением изотопно-гелиевого отношения (ИГО)  $^3He/^4He$  на другой оси этой же диаграммы, связанное с рециклингом. На сводной диаграмме обособилось два типа дегазации Земли («горячей» и «холодной» по П.Н. Кропоткину [13] два типа углеводородной дегазации Земли [12].

На отдельной углерод-гелиевой диаграмме для метана нефтегазовых месторождений [12] выявилось широкое разнообразие значений показателей УГО и ИГО по обеим осям диаграммы. С учетом конфигурации и показателей отдельных изотопных полей на этой диаграмме обособилось два типа нефтегазоносных регионов по линии раздела со значением ИГО  $R = 0,1 R_a$ . На изотопно-гелиевой диаграмме  $^3He-^4He$  также обособились два типа нефтегазоносных регионов с тем же значением ИГО  $R = 0,1 R_a$  по

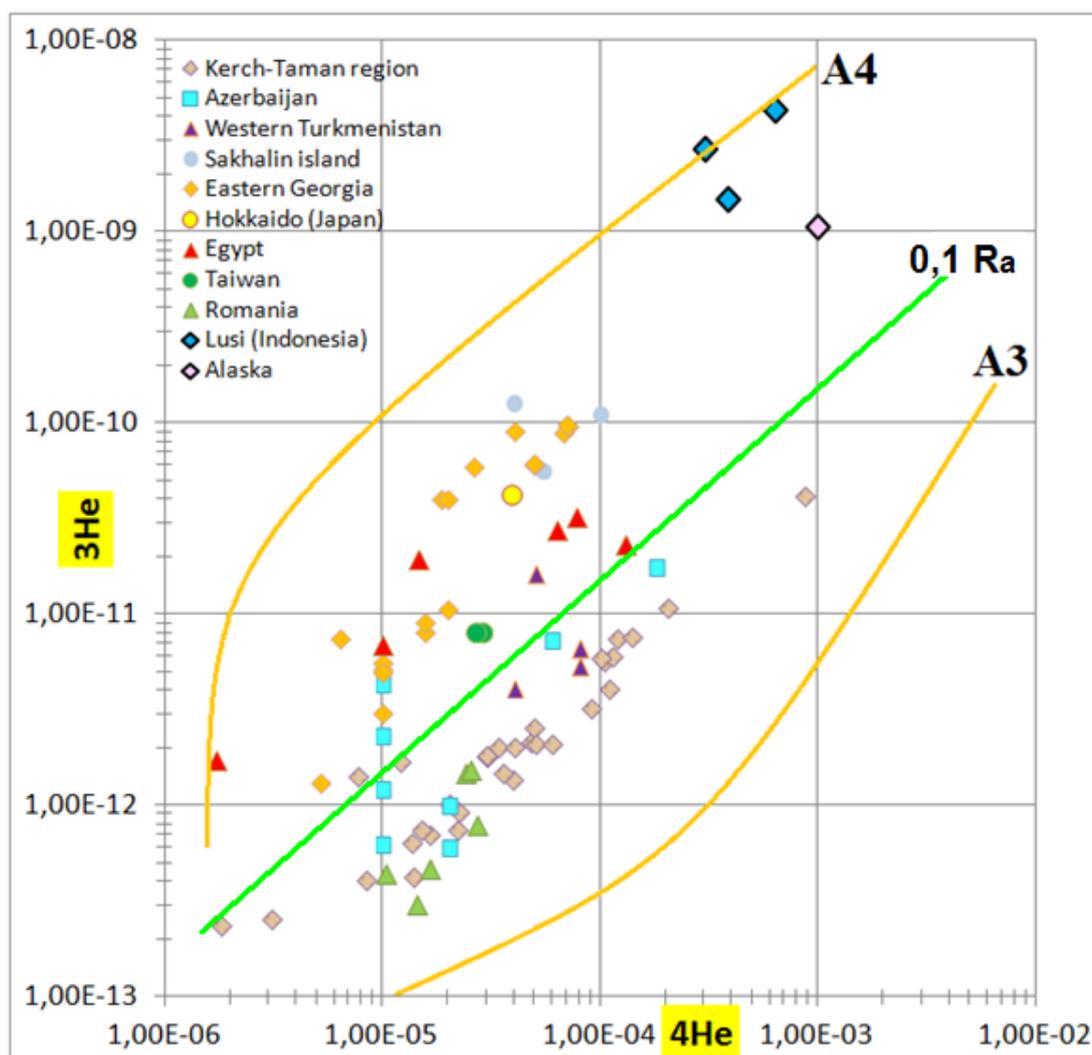
линии их раздела. Регионы с пониженным значением ИГО  $R < 0,1 R_a$  связаны с внутриконтинентальными обстановками и рециклингом континентального корового материала. Регионы с повышенными значениями ИГО в интервале  $R = 0,1-6,5 R_a$  связаны с окраинно-континентальными обстановками и рециклингом океанической и субокеанической коры. Как оказалось, на сводной углерод-гелиевой диаграмме с близким значением ИГО  $R = 0,1 R_a$  выявляется граница, обособляющая «горячую» водно-углекислую дегазацию со стороны ее минимальных значений. В целом, типам нефтегазоносных регионов соответствуют два типа углеводородной дегазации [12, 14].

Наиболее активные процессы углеводородной дегазации Земли, связанные с разгрузками углеводородов, на суше и дне морских акваторий, представлены грязевыми вулканами. Авторами были выполнены обобщения углерод-гелиевых и изотопно-гелиевых данных для метана грязевых вулканов. На углерод-гелиевой диаграмме (рис. 1) региональные изотопные поля для грязевых вулканов формируют полосу-тренд.



**Рис. 1.** Взаимосвязь отношений  $CH_4/{}^3He$  и  $R/R_a$  в газах грязевых вулканов бывшего СССР (Lavrushin et al., 2009) с дополнениями авторов по данным грязевых вулканов других регионов (Prinzhofer et al., 2013; Etiopie et al., 2004; Gordienko et al., 2001; Kazuya Miyakawa et al., 2013; Yang et al., 2003; Mazzini et al., 2012; Motyka et al., 1989); линии A1 и A2 ограничивают изотопное поле метана нефтегазовых месторождений, прямая разграничивает два типа углеводородной дегазации Земли

И на углерод-гелиевой (см. рис. 1), и на изотопно-гелиевой (рис. 2) диаграммах обособляются также два типа грязевых вулканов, с граничной линией значения ИГО  $0,1 R_a$ . При этом наиболее активные разгрузки углеводородов характерны для грязевых вулканов с пониженными значениями ИГО при  $R < 0,1 R_a$ . Становится очевидным, что и наиболее интенсивная флюидно-углеводородная дегазация Земли также связана со структурно-тектоническими обстановками, характеризующимися низкими значениями ИГО  $R < 0,1 R_a$ .



**Рис. 2.** Мультирегиональная изотопно-гелиевая диаграмма для метана грязевых вулканов; кривые А3 и А4 обрамляют изотопное поле метана нефтегазовых месторождений, прямая разграничивает два типа углеводородной дегазации Земли

Можно ли использовать прямые аналогии для больших глубин, считая, что и для них перспективными будут регионы, зоны с пониженными значениями показателя ИГО  $R < 0,1 R_a$ ? Представляется, что для больших глубин в осадочных породах и фундаменте

будут характерны обстановки типа tight в скоплениях углеводородов. Наиболее обогащенные локализованные участки, типа sweet spots, несомненно будут распространены в связи с трубами (каналами) углеводородной дегазации. Но распространение глубинных флюидонасыщенных зон будет контролироваться глубинными флюидно-нефтяными системами и энерго-активными зонами [15]. Представляется, что функционирование таких зон связано с флюидным контролем восстановительных обстановок переработки рециклируемого корового материала в разнообразных процессах мантийно-корового взаимодействия. В сущности, флюидно-нефтяные системы участвуют не только в геологическом круговороте органического вещества и продуктов его трансформации. Они задействованы также в нарастании круговорота углеводородов в ходе геологической эволюции Земли [3], в создании масштабных локализованных восходящих потоков глубинных углеводородных флюидов.

Вывод о доминирующей роли глубинной холодной дегазации в формировании крупных скоплений УВ весомо подкрепляется анализом микроэлементного состава (МЭ) состава нефтей. В [16, 17] показано существование наиболее тесной корреляционной связи МЭ состава нефтей исследованных основных нефтегазоносных бассейнов России со средним химическим составом нижней континентальной коры. Такая связь может осуществляться только на основе глубинного потока флюидов, притом, низкотемпературных вулканических. Этот результат подкрепляется и иным характером микроэлементного состава нефтей (и гидротермальных вод) субвулканической области Камчатки [16]. Для этой области, отвечающей зоне высокотемпературной дегазации с типичными значениями  $R > 0,1 R_a$ , наблюдается наиболее тесная связь МЭ состава нефти со средним химическим составом верхней и средней коры, при этом УВ ресурсы этой области невелики.

Здесь следовало бы изложить ряд важных свидетельств аномально-глубинной природы нефтей из работ Р.П. Готтих и Б.И. Писоцкого [18], связанных с анализом радиоактивных и редкоземельных элементов, природой европиевой аномалии и др. И необходимо также подчеркнуть конвективный характер рециклинга корового материала с глобальным (восстановительные условия, водород) энергетическим подтекстом. Изотопно-гелиевые свидетельства роли процессов рециклинга для обеспечения высокопродуктивной генерации углеводородных флюидов, процессов нефтегазонакопления раскрывают механизмы специфических геодинамических

процессов. Выявление высокой корреляции микроэлементного состава нефтей со средним составом нижней коры может рассматриваться как прогнозный признак в пользу возможности выявления в данной области больших запасов УВ, в том числе в глубинных ловушках. И, напротив, выявление максимальной корреляции МЭ состава нефти с химическим составом верхней коры является признаком развития высокотемпературной ветви дегазации и, соответственно, отсутствия больших скоплений УВ.

Конкретизируется оценка перспектив нефтегазоносности глубокозалегающих комплексов пород осадочного разреза и консолидированной коры (фундамента) нефтегазоносных регионов. Связь процессов массивированного нефтегенеза с зонами рециклинга вещества земной коры и верхней мантии открывает возможности разработки новых признаков высокопродуктивных зон нефтегазонакопления на основе учета данных по комплексу геохимических и геофизических данных.

*Статья написана в рамках выполнения работ по программе Президиума РАН № 8 «Углеводороды с глубоких горизонтов в «старых» нефтегазодобывающих регионах как новый источник энергоресурсов: теоретические и прикладные аспекты».*

### **Литература**

1. *Иванов А.В.* Глубинная геодинамика: границы процесса по геохимическим и петрологическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1, № 1. С. 87–102. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-1-0008>
2. *Mukhopadhyay S., Parai R.* Noble gases: A record of Earth's evolution and mantle dynamics // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2019. Vol. 47. P. 389–419.
3. *Комия Ц.* Континентальный рециклинг или истинный континентальный рост // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 12. С. 1927–1944.
4. *Parai R., Mukhopadhyay S.* Xenon isotopic constraints on the history of volatile recycling into the mantle // Nature. 2018. Vol. 560, No. 7717. P. 223–227. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0388-4>
5. *Добрецов Н.Л.* Основы тектоники и геодинамики Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 2011. 492 с.
6. *Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Тектоника плит и мантийные плюмы – основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика, 2016. Т. 57, № 1. С. 11–30. <https://doi.org/10.15372/GiG20160102>

7. Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина). М.: ГЕОС, 2011. 504 с.
8. *Дмитриевский А.Н.* Полигенез нефти и газа // Генезис нефти и газа: Сб. ст. М.: ГЕОС, 2003. С. 104–105.
9. *Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М., Смирнова М.Н.* Масштабы и темпы восполнения нефтегазовых залежей в процессе их разработки // Генезис нефти и газа: Сб. ст. М.: ГЕОС, 2003. С. 106–109.
10. *Муслимов Р.Х., Трофимов В.А., Плотникова И.Н.* и др. Роль глубинной дегазации Земли и кристаллического фундамента в формировании и естественном восполнении запасов нефтяных и газовых месторождений. Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ, 2019. 264 с.
11. *Бочкарев В.А., Бочкарев А.В.* Восполняемые запасы залежей углеводородов. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2017. 276 с.
12. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Изотопно-гелиевые показатели геодинамических обстановок процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2016. Вып. 1(13). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art8>
13. *Кропоткин П.Н.* Проблема происхождения нефти // Советская геология. 1955. № 47. С. 104–125.
14. *Valyaev B.M., Dremmin I.S.* Hydrocarbon degassing of the earth and origin of oil-gas fields (isotope-geochemical and geodynamic aspects) // Abstracts of Intern. Conf. EGU General Assembly 2016. 17–22 April 2016. Vienna, Austria. 2016. P. 921.
15. *Дмитриевский А.Н.* Теоретические основы и механизмы формирования энергоактивных и флюидонасыщенных зон Земли // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина): Сб. ст. М.: ГЕОС, 2011. С. 33–41.
16. *Пунанова С.А., Родкин М.В.* Сравнение вклада разноглубинных геологических процессов в формирование микроэлементного облика каустобиолитов // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 3. Р. 14–24. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.14-24>
17. *Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидогеодинамика. Прил. к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. М.: Изд. дом «Интеллект», 2017. 285 с.

18. *Готтих Р.П., Писоцкий Б.И.* Элементы-примеси как индикаторы геодинамических обстановок нефтенакопления // Докл. РАН. 2010. Т. 433, № 4. С. 507–511.

## Isotope-geochemical indicators of the depth of oil and gas genesis and accumulation

A.N. Dmitrievsky, B.M. Valyaev\*, M.V. Rodkin

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: \*valyb@mail.ru

**Abstract.** The use of geochemical and isotope-geochemical indicators made it possible to reveal a correlation between the processes of oil and gas formation with the specifics of deep geodynamic processes and hydrocarbon degassing of the Earth. The prospects for oil and gas potential of deep-seated rock complexes of the sedimentary layer and the crustal foundation is specified. The connection of processes of massive petroleum genesis with the recycling zones of the Earth's crust and upper mantle reveals the possibility of developing of indicators of high productive zones of oil and gas accumulation based on data from a range of geochemical and geophysical data.

**Keywords:** isotope-helium relations, carbon-helium relations, oil and gas regions, oil and gas degassing of the Earth, recycling processing, environments, oil and gas formation, trace element composition.

**Citation:** *Dmitrievsky A.N., Valyaev B.M., Rodkin M.V.* Isotope-geochemical indicators of the depth of oil and gas genesis and accumulation // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art21> (In Russ.).

### References

1. *Ivanov A.V.* Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemical and petrological data // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2010. Vol. 1, No. 1. P. 87–102. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-1-0008> (In Russ.).
2. *Mukhopadhyay S., Parai R.* Noble gases: A record of Earth's evolution and mantle dynamics // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2019. Vol. 47. P. 389–419.
3. *Komiya Ts.* Continental recycling or true continental growth // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. Vol. 52, No. 12. P. 1516–1529. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.11.001>
4. *Parai R., Mukhopadhyay S.* Xenon isotopic constraints on the history of volatile recycling into the mantle // *Nature*. 2018. Vol. 560, No. 7717. P. 223–227. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0388-4>
5. *Dobretsov N.L.* Fundamentals of tectonics and geodynamics. Novosibirsk: Publishing House of Novosibirsk university. 2011. 492 p. (In Russ.).
6. *Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V.* Plate tectonics and mantle plumes as a basis of deep-seated Earth's tectonic activity for the last 2 Ga // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57, No. 1. P. 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.002>

7. Degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields. Moscow: GEOS, 2011. 504 p. (In Russ.).
8. *Dmitrievsky A.N.* Polygenesis of oil and gas // The genesis of oil and gas: Collected papers. Moscow: GEOS, 2003. P. 104–105. (In Russ.).
9. *Dmitrievsky A.N., Valyaev B.M., Smirnova M.N.* The scale and rates of replenishment of oil and gas deposits in the process of their development // The genesis of oil and gas: Collected papers. Moscow: GEOS, 2003. P. 106–109. (In Russ.).
10. *Muslimov R.Kh., Trofimov V.A., Plotnikova I.N.* et al. The significance of depth degassing of the Earth and crystalline basement in formation and natural replenishment of oil and gas deposits. Kazan: FEN Publishing House of the Academy of Sciences of Republic of Tatarstan, 2019. 264 p. (In Russ.).
11. *Bochkarev V.A., Bochkarev A.V.* Replaceable hydrocarbon reserves. Moscow: JSC VNIOENG, 2017. 276 p. (In Russ.).
12. *Valyaev B.M., Dremine I.S.* Isotope-helium indicators of the geodynamic environments of oil and gas production and oil and gas accumulation // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics. 2016. Iss. 1(13). 15 p. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art8> (In Russ.).
13. *Kropotkin P.N.* The problem of the origin of oil // Soviet Geology. 1955. No. 47. P. 104–125. (In Russ.).
14. *Valyaev B.M., Dremine I.S.* Hydrocarbon degassing of the earth and origin of oil-gas fields (isotope-geochemical and geodynamic aspects) // Abstracts of Intern. Conf. EGU General Assembly 2016. 17–22 April 2016. Vienna, Austria. 2016. P. 921.
15. *Dmitrievsky A.N.* Theoretical bases and mechanisms of formation of energy-active and fluid-saturated zones of the Earth // Degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields: Collected papers. Moscow: GEOS, 2011. P. 33–41. (In Russ.).
16. *Punanova S.A., Rodkin M.V.* Comparison of the contribution of differently depth geological processes in the formation of a trace elements characteristic of caustobiolytes // Georesursy. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 14–24. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.14-24>
17. *Rodkin M.V., Rundqvist D.V.* Geofluid geodynamics. An appendix to seismology, tectonics, processes of ore and petroleum genesis. Moscow: Intellect Publishing House. 2017. 285 p. (In Russ.).

18. *Gottikh R.P., Pisotskii B.I.* Impurity elements as geodynamic indicators of oil accumulation conditions // *Doklady Earth Sciences*. 2010. Vol. 433, No. 2. P. 1026–1030. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10080088>