

ЭНДОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР

А.Н. Дмитриевский, И.А. Володин, И.Я. Чеботарева
ИПНГ РАН, e-mail: a.dmitrievsky@ipng.ru, irinache@inbox.ru

Как уже ранее отмечалось в работах авторов, динамические процессы, реализующиеся в геосферных оболочках в виде потоков энергии и вещества из недр Земли, приводят к формированию упорядоченностей в структуре геосреды, к образованию диссипативных структур (по И.Р. Пригожину), которые «могут существовать вдали от равновесия лишь за счет достаточно большого потока энергии и вещества». Особенностью этих структур является изменение их параметров в зависимости от интенсивности энергетического потока. В объемах литосферы, подверженных постоянным эндогенным воздействиям, «в энергоактивных зонах Земли» [1], формируются пространственно-временные геологические структуры. В них происходит образование суммарного энергетического поля, названного автоволновым полем [1]. При этом возможна:

- аккумуляция энергии, что приводит к формированию энергоактивных зон литосферы;
- трансформация энергии;
- диссипация с частичным накоплением энергии, что обеспечивает стабильность существования геологической структуры как диссипативной на потоке энергии и определяет время жизни таких структур [2].

Знание энергетики и динамики пространственно-временных геологических структур важно для решения задач нефтяной геологии и геофизики. Такие зоны могут быть зонами генерации нефти и газа, либо зонами транзита, в которых происходит процесс накопления глубинных углеводородов.

Мы не имеем прямой возможности наблюдать процесс формирования геологических диссипативных структур в геологическом масштабе времени, но в качестве аналога можно рассмотреть результаты полевых сейсмологических исследований с использованием метода эмиссионной сейсмической томографии [3–4]. Результаты этих исследований позволяют в «быстром» времени наблюдать процесс формирования диссипативных структур – кластеров сейсмической эмиссии, например, при интенсивном воздействии на среду во время работ по формированию гидроразрыва пласта [5]. Эффект сейсмической эмиссии – сейсмический отклик энергонасыщенных объемов среды на

различного рода внешние воздействия^{*}, был открыт в восьмидесятых годах прошлого века и позже детально исследован. Источники эмиссии связаны с положением структурных неоднородностей среды, путями флюидных потоков, с неустойчивыми зонами концентрации напряжений и сильных термических градиентов, подвижными бортами трещин и разломов. Источники сейсмической эмиссии в трехмерном пространстве хорошо локализованы и характеризуются четкими параметрами (мощностью излучения, частотным спектром, пространственными координатами), значение которых может отслеживаться в реальном времени.

На рис. 1 приведена визуализация глубинных сейсмических источников методом эмиссионной сейсмической томографии по записям сейсмического фона [4].

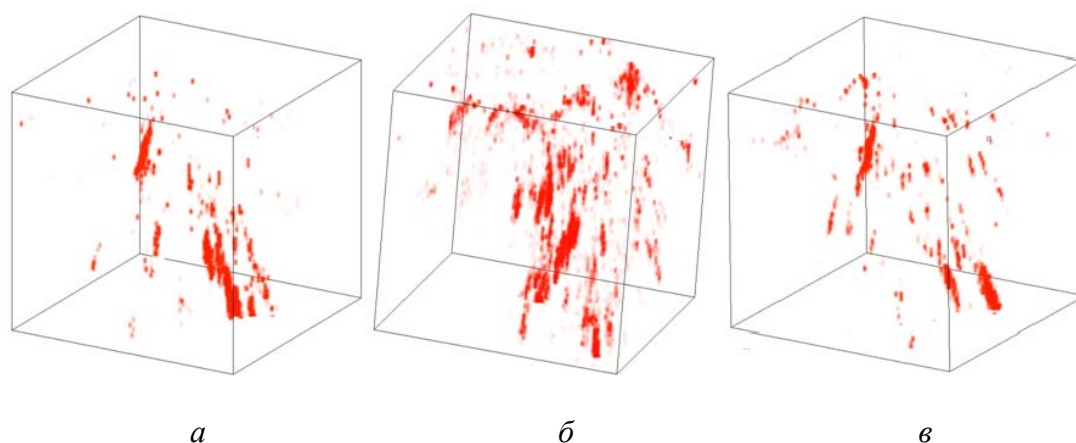


Рис. 1. Визуализация глубинных сейсмических источников методом эмиссионной сейсмической томографии по записям сейсмического фона, зарегистрированного на поверхности: *а* – до, *б* – во время и *в* – после гидравлического разрыва пласта [4]

На рис. 1*а* показано фоновое распределение источников сейсмической эмиссии до начала работ. Это распределение можно рассматривать как диссипативную структуру, которая формируется на фоновых потоках энергии. В них вносят вклад тектонические и приливные деформации, локальные природные и техногенные источники сейсмических фоновых колебаний, тепловые потоки и все другие виды постоянных внешних воздействий на рассматриваемый объем среды. Из анализа результатов исследований

^{*} Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // Диплом на открытие №282 Госкомизобретений СССР. М. 1983. С. 1.

сделан вывод, что основные источники фонового излучения связаны с межблочными швами и зонами повышенной природной трещиноватости.

Как видно на рис.1б, изменение интенсивности внешнего воздействия на среду на времени роста давления при закачивании жидкости приводит к формированию новых кластеров эмиссионного излучения, распределение которых сильно отличается от фонового распределения до начала гидроразрыва пласта. То есть, существующая эмиссионная структура уже не может обеспечить диссипацию резко увеличенного потока энергии, и формируется новая диссипативная структура с гораздо большим числом активно излучающих кластеров.

После окончания работ по гидроразрыву пласта, по мере релаксации напряжений среда возвращается к прежней норме неравновесности, характерной для данного объема геосреды, и прежнее фоновое распределение эмиссионных источников восстанавливается (рис. 1в).

Стационарные пространственно-временные геологические диссипативные структуры формируются и живут на потоках энергии и массопереноса, и в них происходит транзит, поглощение и взаимотрансформация энергии акустического и электромагнитного излучения, химические и физические изменения пород и флюида. Периодические тектонические и сейсмические воздействия способствуют развитию протяженных разломов в земной коре, дроблению и перетиранию пород между бортами разлома. Периодическое высоконапорное восходящее внедрение флюида из зон устойчивой глубинной флюидной активности может приводить к повторяющимся природным гидроразрывам монолитных пород и объемным разрушениям при гидротермальных взрывах, происходящих за счет резкого изменения давления. Это способствует развитию вертикально протяженных высокопроницаемых каналов.

К геологическим диссипативным структурам могут быть отнесены и разнообразные кольцевые структуры разного генезиса, размеров и глубины залегания. С кольцевыми структурами оказываются связанными крупные и уникальные месторождения полезных ископаемых (молибденовые, медные, многие карбонатитовые, апатитовые). С этими же структурами связаны нефтяные, газовые и другие месторождения [6]. Кольцевые структуры имеют размеры от десятка метров до сотен километров. В вопросе формирования кольцевых структур тектонического происхождения полной ясности нет. Как отмечается в работе Н.И.Николаева [7], на этот счет имеются разные предположения.

Кольцевые структуры связывают с выдавливанием мантийного вещества из астеносферного слоя в земную кору, с «горячими точками» расположенных на глубине энергетических центров, с ротационными деформациями и развитием неустойчивости в системе литосфера – астеносфера и пр. Встречающиеся структуры спирального типа объясняются турбулентным характером перемещения в их пределах эндогенного вещества, или их связывают с точечными участками тектонических напряжений сжатия (растяжения) и другими причинами.

Первооткрыватель вихревых структур Ли Сы Гуан [8], изучая обнажения пород в геологических разрезах Китая и наблюдая в модельных экспериментах разрушение различных пород при вращении основания образца, пришел к выводу, что вихревые структуры являются результатом сдвигов, возникающих при вращении отдельных масс земной коры. При этом образуется характерная система трещин и сколов, которая в плане имеет вихревую конфигурацию. В области ротационных деформаций появляется разномасштабная самоподобная система мелкой трещиноватости и крупных трещин. Детали наблюдений Ли Сы Гуана, приведенные в его работе, по сути, описывают механизм самоорганизации разноранговой, условно-вязкой геологической среды при ротационных деформациях.

Значительный интерес представляют малоразмерные в плане вертикальные высокопроницаемые структуры, секущие слои с различной литологией – субвертикальные зоны деструкции [9–10]. Их природа еще недостаточно исследована, но наличие подобных зон вполне достоверно. Они связываются с путями флюидной разгрузки недр Земли, в том числе углеводородного вещества, что может приводить к образованию малоразмерных в плане, но богатых многоэтажных месторождений, с возможностью глубинной подпитки их при разработке. Также могут формироваться месторождения жильного типа с газовой фазой в центральной части и нефтяной – на периферии. В качестве примера в монографии [9] приводятся аналогичные месторождения, открытые вблизи г. Ханты-Мансийска внутри девонских карбонатных образований в 1983 г. В цитируемой монографии отмечается, что «большинство газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений на севере Западной Сибири приурочены к очагам повышенной концентрации субвертикальных зон деструкции».

Авторы работ [9–10] называют вертикальные высокопроницаемые структуры «геосолитонами» и объясняют их образование действием повторяющихся одиночных

вихревых импульсов, порожденных в ядре Земли и реализующих вертикальное структурообразование, модель которого иллюстрируется на рис. 2 (по данным [11]). При этом над субвертикальной зоной деструкции образуются положительные формы, окаймленные на периферии отрицательными формами (см. рис. 2б). Внутри трубки зоны деструкции происходит растрескивание и дилатансионное разуплотнение пород с максимумом в осевой части. Отметим, что наличие «вихревых импульсов» с корнями, достигающими ядра Земли, никоим образом не доказано. Этот вопрос требует и теоретического, и экспериментального обоснования. Однако наличие на некоторых временных сейморазведочных разрезах характерных следов зон деструкции не заметить невозможно. На временных разрезах (см. рис. 2а), четко видны вертикально протяженные трубки с «размытым заполнением», внутри которых отражающие площадки отсутствуют и протяженная слоистая сейсмо-фациальная структура разрушена.

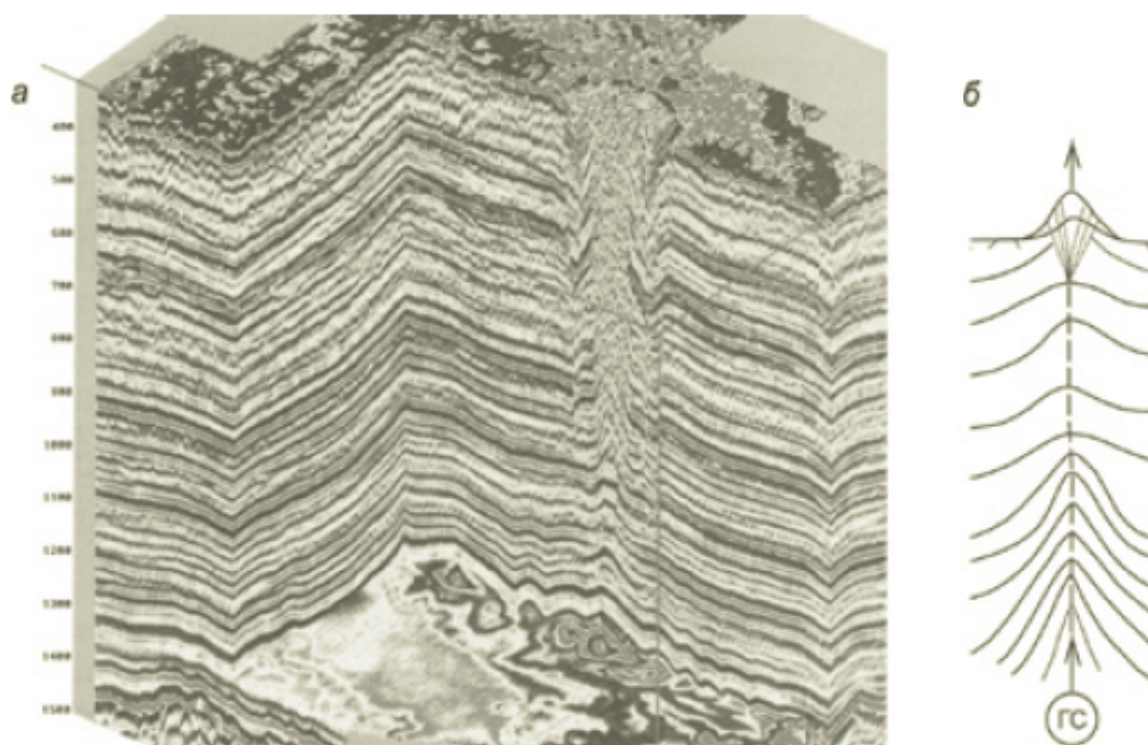


Рис. 2. Модель «геосолитонного структурообразования»: а – композиция горизонтального и вертикального сечения волнового поля (по материалам 3D сейморазведки), проходящего через геосолитонную трубку; б – модель структурообразования при дегазации Земли (по данным [11], монтаж рисунков из [9])

В монографии ([9], рис. 19) приведен временной сейморазведочный разрез для нефтяного месторождения Лебяжьего, где баженовская свита пересекается

вертикальными зонами деструкции. На этом разрезе показана одна из наиболее высокодебитных скважин, попавшая в верхнюю часть вертикальной высокопроницаемой трубки. Контрастная с ней соседняя скважина, расположенная вне трубки, имеет совсем другие производственные характеристики. На рис. 3 показаны результаты наших исследований на том же месторождении [12]. Отчетливо видны изображения проявившихся кластеров наиболее мощного эмиссионного излучения, полученные в разные интервалы времени в течение одного дня наблюдений. Область излучения выглядит как вертикальный шнурообразный источник (или несколько сливающихся в вершине источников) и охватывает диапазон глубин, показанный на рисунке. Область излучения стабильна в плане и расположена под скважиной, вскрытой за несколько дней до времени наблюдений и давшей сильный приток нефти. В плане эмиссионные источники расположены вне разломной зоны в средней части целого блока [12]. Мощность осадочного чехла в районе исследований составляет 2.9–3.7 км, а исследуемый объем (см. рис. 3) является кубом с ребром 6 км. Эмиссионные источники уверенно прослеживаются ниже осадочного чехла, в кристаллическом фундаменте. Свечение вертикального шнуроподобного источника иногда является одинаковым на всех глубинах, иногда интенсивность излучения в некотором диапазоне глубин больше.

Численное моделирование различных сейсмологических ситуаций не позволило получить артефакта подобного вида при использовании метода эмиссионной томографии, то есть, мы получили изображение реального протяженного тонкого вертикально вытянутого излучателя. Наблюдаемый шнурообразный эмиссионный сейсмический источник может являться субвертикальной зоной деструкции – ядром типичного геологического объекта, существование которого на данном месторождении выявлено сейсморазведкой. Если при 3D-сейсморазведке прослеживание вертикальных зон деструкции на глубинах более 2–3 км затруднено, то при использовании эмиссионной томографии принципиальных проблем не возникает. Эмиссионная томография позволяет уверенно выделять излучающие кластеры, связанные с различными геологическими объектами, на глубинах 8–15 км [13] и даже в нижней коре и верхней мантии [14].

Исследования эмиссионных источников на разрабатываемых месторождениях показывают, что на потоках энергии могут формироваться не только «неподвижные», но и перемещающиеся с большой скоростью диссипативные структуры [12]. Пример такого

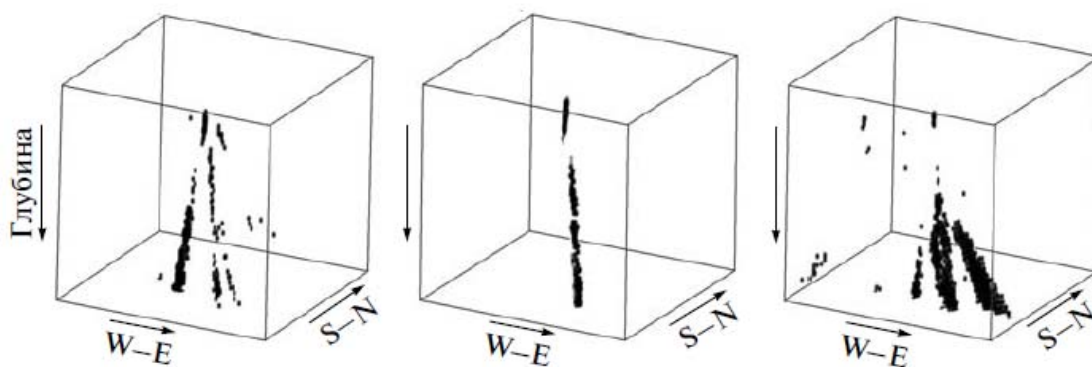


Рис. 3. Изображение вертикальных шнуровидных кластеров сейсмической эмиссии по материалам полевых наблюдений на территории разрабатываемого месторождение Лебяжье, Западная Сибирь [12]. Пояснения – в тексте

объекта приведен на рис. 4. На представленных изображениях проявляется движущийся сейсмический источник, локализованный по всем трем пространственным координатам. Этот источник появляется у основания кубического объема, на глубине 6 км, и в течение 400 секунд всплывает до середины данного кубического объема. Средняя скорость всплытия – около 10 м/сек.

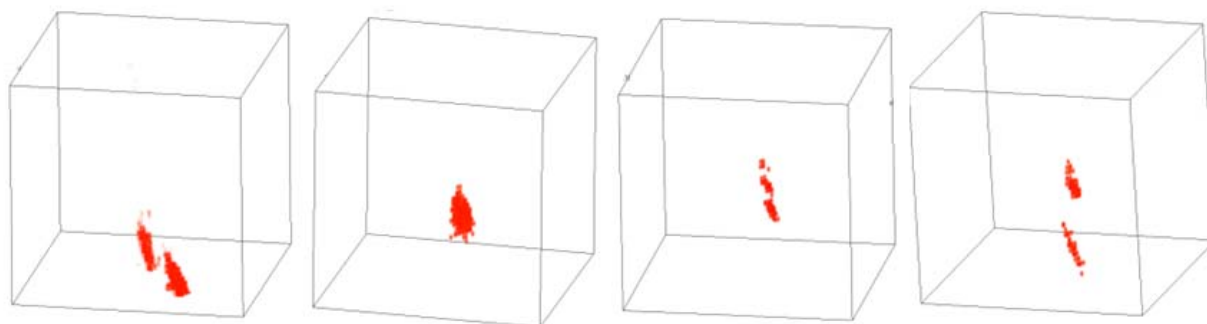


Рис. 4. Всплывающий в массиве горных пород эмиссионный солитоноподобный объект – подвижная диссипативная сейсмическая структура, сформированная на потоках фоновой и техногенной энергии. Размер ребра кубического объема 6 км [12]

Сейсмическое излучение объекта настолько мощное, что на одиночных сейсмических записях соответствующих временных интервалов видны характерные длинные слабые сейсмические фазы с нечеткими вступлениями. Выявленный в работе [12] тип движущегося локализованного сейсмического источника наблюдался впервые, и неизвестно, насколько обычным является подобное явление, систематических наблюдений на разрабатываемых месторождениях просто не проводилось. Следует

подчеркнуть, что среда в районе сейсмологических наблюдений находилась в сильно неравновесном состоянии вследствие процесса отбора нефти и длительной закачки упругой энергии (это отражалось в виде интенсивной техногенной помехи). Данные процессы могли привести к существенным изменениям напряженного состояния среды и циркуляции энергетических и флюидных потоков. В силу неоднородности свойств геосреды и возникновения значительных флуктуаций параметров при высокой неравновесности ее состояния, в некоторых зонах возможно сильное поглощение энергии с образованием диссипативных структур, которые могут реализоваться в виде автосолитонов.

Работа выполнялась в рамках Программы Президиума РАН «Поисковые и прикладные исследования в интересах развития Арктического региона РФ».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриевский А.Н.* Фундаментальные проблемы геологии нефти и газа: Акад. чтения на учен. совете Академии, 19 апр. 1994 г. М.: ГАНГ им. И.М. Губкина, 1995. 15 с.
2. *Дмитриевский А.Н.* Прогноз, поиск и разведка нефти и газа – фундаментальные исследования // Актуальные проблемы прогноза, поисков и освоения углеводородных ресурсов земных недр: Сб. ст. Юбилейной науч. сессии, посвященной 80-летию ВНИГРИ. Спб.: ВНИГРИ, 2009. С. 14–35.
3. *Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я.* Способ сейсмической разведки: А.с. 1000962 СССР. – № 3213796, Заявл. 08.12.80; Оpubл. 28.02.83 // Открытия, изобретения. 1983. № 8. 4 с.
4. *Чеботарева И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 844–853.
5. *Чеботарева И.Я., Володин И.А.* Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме // Докл. РАН. 2012. Т. 444. № 2. С. 202–207.
6. Космическая информация в геологии / Под ред. В.Г. Трифонова, В.И. Макарова, Ю.Г. Сафонова, П.В. Флоренского. М: Наука. 1983. 370 с.
7. *Николаев Н.И.* Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 491 с.

8. *Ли Сы-Гуан.* Вихревые структуры и другие проблемы относящиеся к сочетанию геотектонических структур северо-западного Китая. М.: Госуд. науч.-техн. изд. литературы по геологии и охране недр, 1958. 132 с.
9. *Мегеря В.М.* Поиск и разведка залежей углеводородов, контролируемых углеводородной дегазацией Земли. М.: Локус Станди, 2009. 256 с.
10. *Бембель Р.М., Бембель С.Р., Мегеря В.М.* Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Вектор Бук, 2003. 224 с.
11. *Ляхницкий Ю.С.* Трансслоевые немагматические явления – сходство и различия // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 66–77.
12. *Чеботарева И.Я.* Новые алгоритмы эмиссионной томографии для пассивного сейсмического мониторинга разрабатываемых месторождений углеводородов // Физика Земли. 2010. № 3. С. 7–36.
13. *Tchebotareva I.Ya., Nikolaev A.V., Sato H.* Seismic Emission Activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan // Physics of the Earth and planetary interiors. 2000. Vol. 120, № 3. P. 167–182.
14. *Чеботарева И.Я.* Алгоритм сейсмической эмиссионной томографии при ослаблении пространственной корреляции сигнала // Вестник МГОУ. Естественные науки. 2011. № 1. С. 101–107.

REFERENCES

1. *Dmitrievskiy A.N.* Fundamental'nye problemy geologii nefiti i gaza: Akad. chteniya na uchen. soвете Akademii, 19 apr. 1994 g. М.: GANG im. I.M. Gubkina, 1995. 15 s.
2. *Dmitrievskiy A.N.* Prognoz, poisk i razvedka nefiti i gaza – fundamental'nye issledovaniya // Aktual'nye problemy prognoza, poiskov i osvoeniya uglevodorodnykh resursov zemnykh neдр: Sb. st. YUбилейnoy nauch. sessii, posvyashchennoy 80-letiyu VNIGRI. Spb.: VNIGRI, 2009. S. 14–35.
3. *Nikolaev A.V., Troitskiy P.A., Chebotareva I.Ya.* Sposob seysmicheskoy razvedki: A.s. 1000962 SSSR. – № 3213796, Zayavl. 08.12.80; Opubl. 28.02.83 // Otkrytiya, izobreteniya. 1983. № 8. 4 s.
4. *Chebotareva I.Ya.* Metody passivnogo issledovaniya geologicheskoy sredy s ispol'zovaniem seysmicheskogo shuma // Akust. zhurn. 2011. T. 57, № 6. S. 844–853.

5. *Chebotareva I.Ya., Volodin I.A.* Obrazy protsessa gidrorazryva plasta v seysmicheskom shume // Dokl. RAN. 2012. T. 444. № 2. S. 202–207.
6. Kosmicheskaya informatsiya v geologii / Pod red. V.G. Trifonova, V.I. Makarova, Yu.G. Safonova, P.V. Florenskogo. M.: Nauka. 1983. 370 s.
7. *Nikolaev N.I.* Noveyshaya tektonika i geodinamika litosfery. M.: Nedra, 1988. 491 s.
8. *Li Sy-Guan.* Vikhrevye struktury i drugie problemy otnosyashchiesya k sochetaniyu geotektonicheskikh struktur severo-zapadnogo Kitaya. M.: Gosud. nauch.-tekhn. izd. literatury po geologii i okhrane neдр, 1958. 132 s.
9. *Megerya V.M.* Poisk i razvedka zalezhey uglevodorodov, kontroliruemyykh uglevodorodnoy degazatsiey Zemli. M.: Lokus Standi, 2009. 256 s.
10. *Bembel' R.M., Bembel' S.R., Megerya V.M.* Geosolitony: funktsional'naya sistema Zemli, kontseptsiya razvedki i razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov. Tyumen': Vektor Buk, 2003. 224 s.
11. *Lyakhnitskiy Yu.S.* Transsloevye nemagmaticheskie yavleniya – skhodstvo i razlichiya // Regional'naya geologiya i metallogeniya. 2014. № 58. S. 66–77.
12. *Chebotareva I.Ya.* Novye algoritmy emissionnoy tomografii dlya passivnogo seysmicheskogo monitoringa razrabatyvaemykh mestorozhdeniy uglevodorodov // Fizika Zemli. 2010. № 3. С. 7–36.
13. *Tchebotareva I.Ya., Nikolaev A.V., Sato H.* Seismic Emission Activity of Earth's Crust in Northern Kanto, Japan // Physics of the Earth and planetary interiois. 2000. Vol. 120, № 3. P. 167–182.
14. *Chebotareva I.Ya.* Algoritm seysmicheskoy emissionnoy tomografii pri oslablenii prostranstvennoy korrelyatsii signala // Vestnik MGOU. Estestvennye nauki. 2011. № 1. С. 101–107.