

УДК 551.2.03, 550.31:550.834
DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art81

ДИССИПАТИВНАЯ СЕЙСМОМЕТРИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Чеботарева И.Я.
Институт проблем нефти и газа РАН
E-mail: a.dmitrievsky@ipng.ru

Аннотация. В работе рассмотрены теоретические аспекты структурирования энергетического потенциала недр Земли в виде различных пространственно-временных форм, которые являются диссипативными структурами и формируются в результате взаимодействия геологической среды с потоками энергии и физическими полями различной природы. Изменение энергии внешнего воздействия активизирует диссипативные структуры, порождая эмиссионное сейсмоакустическое и электромагнитное излучение в энергоактивных зонах. Специальные геофизические методы позволяют провести 3D локализацию глубинные источники эмиссионного излучения, визуализировать энергоактивную область пород, оценить мощность и спектр излучения, проследить временную динамику текущего состояния среды. В частности сотрудниками ИПНГ РАН проведена адаптация метода эмиссионной сейсмической томографии для исследования структурных особенностей геологической горных пород и энергетики месторождений нефти и газа в условиях сильных техногенных помех, в том числе, на стадии разработки. При этих работах источники эмиссии хорошо локализованы и характеризуются четкими параметрами. В настоящее время в ИПНГ РАН, в рамках проблематики данной статьи, развиваются новые походы к исследованию геологической среды и диагностики текущего состояния энергоактивных зон, объединенные общим названием «Диссипативная сейсмометрия». Результаты первых исследований говорят о том, что они могут стать основой для развития методов прогнозирования скоплений нефти и газа на больших глубинах.

Ключевые слова: месторождения углеводородов, среды с нелинейностью и диссипацией, диссипативные структуры, энергоактивные зоны, сейсмическая эмиссионная томография.

DISSIPATIVE SEISMOMETRY: THEORETICAL BASES AND PROSPECTS OF USE

Dmitrievsky A.N., Volodin I.A., Chebotareva I.Ya.

Oil and Gas Research Institute RAS

E-mail: a.dmitrievsky@ipng.ru

Abstract. The paper discusses the theoretical aspects of structuring the energy potential of the Earth's interior in the form of various spatial-temporal forms, which are dissipative structures and are formed as a result of the interaction of the geological environment with energy flows and physical fields of different nature. A change in the energy of an external action activates dissipative structures which generate seismoacoustic and electromagnetic radiation in energy-active zones. Special geophysical methods allow 3D localization of the deep sources of emission, visualize the energy-active region of rocks, estimate the power and spectrum of radiation and track the temporal dynamics of the current state of the environment. In particular, the staff of OGRI RAS adapted the method of emission seismic tomography to study the structural features of geological rocks and energy of oil and gas fields in conditions of strong men-made noise, including at the development stage. During these studies emission sources are well localized and characterized by clear parameters. At the present time, within the framework of the problems of this article, new approaches to the study of the geological medium and diagnostics of the current state of energy-active zones named «Dissipative seismometry» are being developed. The results of the first studies suggest that they can be the basis for the development of methods for predicting the accumulation of oil and gas at great depths.

Keywords: hydrocarbon fields, medium with nonlinearity and dissipation, dissipative structures, energy-active zones, seismic emission tomography.

Эндогенные энергетические потоки приводят к формированию зон с избыточной энергией. В процессе эволюции происходит структурирование энергетического потенциала Земли, т.е. пространственно-временные формы ее энергетики состоят из различных элементарных звеньев: каналов, потоков энергии, очагов и энергоактивных зон. Энергоактивные зоны Земли (ЭАЗ) формируются в результате взаимодействия геологической среды с потоками энергии и физическими полями различной природы [1–8]. Это обусловлено спецификой локальной неоднородности вещественного состава геологической среды, состоящей из структурных элементов: природных микрогенераторов, микроосцилляторов, микрорезонаторов, характеристики которых определяют спектр

поглощения и излучения энергии этой средой. В ЭАЗ происходят аномальное поглощение энергии физических полей, диссипация энергии из этих зон в виде различных излучений, эмиссии, а также преобразования энергии внутри зоны, приводящие к автоволновой и автосолитонной динамике, нелинейной флюидодинамике и другим нелинейным эффектам. Энергоактивные зоны проявляются в физических полях. В частности, даже при малом (низкочастотном) воздействии различных источников, которые постоянно присутствуют в недрах Земли, эти зоны начинают «светиться» в сейсмических и акустических диапазонах частот, вызывая сейсмоакустическую эмиссию. Природа эмиссии – трансформация собственной энергии среды в различные локально неустойчивые состояния, которые становятся источниками излучения при различных воздействиях. Эти эффекты могут быть реализованы: 1) в заземленных неравновесных состояниях, которые формируются во фрактальных структурах среды и при снятии сдерживающих факторов могут проявиться в динамике геосреды в виде импульсных или шумоподобных источников упругих колебаний; 2) в элементах структуры геосреды – микрорезонаторах, аккумулирующих энергию по механизмам, аналогичным микроволновым биллиардам; 3) в автоколебательных структурах, формирующихся в капиллярных каналах, например при несмешивающемся вытеснении нефти в пористых средах; 4) в структурах химического потенциала, которые представлены в молекулярных спектрах широкого частотного диапазона, включая террагерцевый диапазон.

Метод эмиссионной сейсмической томографии [9–15] позволяет наблюдать источники сейсмической эмиссии в объеме геологической среды в режиме реального времени. Он был разработан в ИФЗ РАН [9] специально для наблюдения за экстремально слабыми шумоподобными источниками без четких вступлений, сигналы которых могут быть полностью погребены в шуме и невидимы на единичных записях.

Метод усовершенствован в ИПНГ РАН и адаптирован к работе в условиях сильных техногенных помех для исследования энергетического состояния геологической среды и энергетики месторождений нефти и газа, в том числе, на стадии разработки [10–15]. Стационарные ЭАЗ в литосфере проявляются в виде зон сейсмической эмиссии. Их существование обосновано пространственно-временной стабильностью картины распределения энергии микросейсмических колебаний. При этом источники эмиссии локализованы и характеризуются четкими параметрами.

При построении физико–математических моделей нелинейной динамики в ЭАЗ волнового (солитонного) и автоволнового (автосолитонного) типов учитываются связи между электромагнитными и сейсмоакустическими полями, между энергетическими параметрами химического потенциала геологической среды и ее флюидонасыщенностью. Уравнения солитонной динамики для огибающих сейсмического диапазона частот поля деформаций, где энергия движения солитона подпитывается электромагнитным полем, имеют вид двойного нелинейного уравнения Шредингера.

Современные исследования механизмов генерации и аккумуляции УВ приводят к необходимости анализа динамики энергоактивных зон литосферы, представляющих собой пространственно–временные структуры, в пределах которых происходит аккумуляция эндогенной энергии [16,17]. Специфическая особенность моделирования динамики ЭАЗ состоит в крайней сложности соответствующих физико–математических моделей, создаваемых на грани возможностей современной математической физики.

Установлены динамические процессы, протекающие при высоких частотах и энергии в ЭАЗ, приводящие к наблюдаемым на геодинамических полигонах тектоническим эффектам. Показано, что эти процессы также контролируют флюидодинамические режимы, ответственные за механизмы формирования месторождений УВ. Движущей силой в данном случае является организованная в результате формирования локальных когерентностей энергия в тепловой части ИК–диапазона электромагнитного поля и в гиперзвуковой части акустических спектров. С этими же спектрами связаны также энергия супрамолекулярных структур, преобразования органоминеральной системы, приводящие к генерации нефти и газа. В этом случае эмиссионные спектры террагерцевого диапазона имеют наибольшие амплитуды и высокий процент организованной энергии низкочастотной части теплового спектра, так как коллективные эффекты подкрепляются структурно организованной энергией.

Для решения же практических задач прогнозирования скоплений углеводородов требуются геофизические методы диагностики текущего состояния ЭАЗ. При наличии различных подходов к нефтегазогенерации во всех случаях эти ЭАЗ являются либо источниками УВ, либо промежуточными, транзитными зонами (коровые волноводы), в пределах которых происходит процесс аккумуляции флюидов, в том числе глубинных углеводородов. С целью практического использования построенной модели, описывающей высокочастотную динамику ЭАЗ, необходимо создать систему

индикаторов динамических режимов в рассматриваемых зонах. В настоящее время в ИПНГ РАН, в рамках проблематики данной статьи, развиваются новые походы к исследованию геологической среды, объединенные общим названием «Диссипативная сейсмометрия» [18,19].

Для создания геофизических методов, основанных на регистрации сейсмического и электромагнитного полей на дневной поверхности, важно, что распространение волнового пакета в линейной области при отсутствии дисперсии не изменяет его нелинейной структуры. Поэтому приходящие из глубоких горизонтов земной коры эффекты нелинейного рассеяния в виде определенных конфигураций волновых пакетов, сформированных в ЭАЗ, могут быть наблюдаемы и идентифицированы на дневной поверхности. Это может стать основой для создания пассивных комплексных геофизических методов диагностики состояний ЭАЗ, определенных различными нелинейными конфигурациями связанных электромагнитных и сейсмоакустических полей. В свою очередь, знание этих состояний позволит с новых позиций решать задачи прогнозирования скоплений нефти и газа на больших глубинах.

Наличие флюидной компоненты привносит уникальную возможность не только учесть влияние энергетического воздействия на функционирование стационарной геологической системы, но и реально оценить влияние второй важнейшей компоненты – вещественной составляющей – на особенности обменных процессов в открытой неравновесной системе.

Активные системы описываются уравнениями макроскопической кинетики, которые могут быть использованы для характеристики взаимодействия флюида с потоком энергии, проходящей через геосреду. Система уравнений описывает распространение фронта концентрации флюида в геологической среде на энергетических потоках, что является автоволновым процессом, в результате которого система переходит из одного состояния в качественно иное. В стандартной постановке задачи система уравнений допускает стационарное автоволновое решение в виде распространяющегося фронта концентрации флюида. Более разнообразные стационарные состояния реализуются в случае, когда происходит подкачка энергии в систему. В таких системах могут возникать статические, пульсирующие или бегущие области концентрации флюида, вне которых параметры энергии и концентрации флюида остаются постоянными.

Формирование стационарной неустойчивости геологической системы в нелинейной композиции физических полей разной природы сопровождается динамикой элементов и структурными преобразованиями.

При флюидизации диссипативной гетерогенной геосистемы формируются конкурирующие энергетические и флюидные неравновесные, неустойчивые структуры, активность которых контролируется автоволновым полем.

Энергетическая и флюидная подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости системы. Рост неустойчивости приводит к формированию флуктуаций, которые при увеличении энергетического и флюидного воздействия преобразуются в автосолитоны. «Компромисс» между энергией, флюидом и структурой среды приводит к формированию статических и динамических автосолитонов. Последующая энергетическая и флюидная «накачка» переводит уединенные состояния автосолитонного типа в новое структурное флюидно–энергетическое состояние. Реализация процессов флюидизации имеет свою специфику в каждой из подсистем и элементов сложной неоднородной геологической системы. Таким образом, автосолитоны – это диссипативные неравновесные структуры, образованные в результате конфликта энергетических и флюидодинамических процессов.

По-иному процессы флюидизации происходят в однородной геосистеме. В результате постоянного энергетического воздействия в нелинейных диссипативных однородных по строению геологических системах (подсистемах, элементах) формируются коллективные явления, способствующие переводу этих систем в когерентное состояние. Когерентное состояние формирует энергетическую структуру геосистемы, которая препятствует флюидизации системы. Флюид стремится разрушить энергетическую когерентную структуру и увеличить флюидонасыщенность системы, а энергия, накопленная в геосистеме, препятствует реализации этого процесса. Флюидизация приводит к появлению флюидизированных очагов и росту неоднородности в геосистеме. Формирование неоднородностей в конечном счете разрушает когерентную среду геосистемы, чем обеспечивается полная флюидизация геологического тела.

Выполнено по программе Президиума РАН «Месторождения стратегического сырья», подпрограмма «Нефть из глубоких горизонтов осадочных бассейнов», а также в рамках выполнения государственного задания по темам «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных

сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА–А16–116021510125–7 и «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности», № АААА–А16–116031750016–3.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриевский А.Н.* 1994. Фундаментальные проблемы геологии нефти и газа. Академические чтения на ученом совете Государственной Академии нефти и газа имени И.М. Губкина. 15 с.
2. *Дмитриевский А.Н.* Глобальная динамика Земли // Геология, геофизика и разраб. нефт. и газовых месторождений. 2002. № 5. С. 17–19.
3. *Дмитриевский А.Н., Володин И.А.* Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 3. С. 395–400.
4. *Дмитриевский А.Н.* Полигенез нефти и газа // Доклады РАН. 2008. Т. 419, № 3. С. 373–377.
5. *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.
6. *Дмитриевский А.Н.* Энергетика, динамика и дегазация земли // Актуальные проблемы нефти и газа. 2010. Вып. 1(1). 22 с. Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (дата обращения: 09.01.2018).
7. *Дмитриевский А.Н.* Прогнозирование нефтегазоносности недр: теория, методы, практические результаты. Избранные труды. Т. 3. М.: Наука, 2011. С. 12–21.
8. *Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Чеботарева И.Я.* Эндогенные факторы формирования геологических диссипативных структур земли // Актуальные проблемы нефти и газа. 2016. Вып. 3(15). – Режим доступа: http://www.oilgasjournal.ru/issue_15/dmitrievsky-volodin.html (дата обращения: 15.06.2018).
9. *Николаев А.В., Троицкий П.А., Чеботарева И.Я.* (1983). Способ сейсмической разведки: А.с. 1000962 СССР. № 3213796, Заявл. 08.12.80; Опубл. 28.02.83. *Открытия, изобретения*, 8, 4 с.
10. *Чеботарева И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 844–853.

11. Володин И.А., Чеботарева И.Я. (2014). Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий. *Акустический журнал*, 60(5), с. 505–517. DOI: 10.7868/S0320791914050141
12. Чеботарева И.Я. Эмиссионная томография – базовый инструмент для технологий изучения месторождений углеводородов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 2 (17). – Режим доступа: http://www.oilgasjournal.ru/issue_17/chebotareva.html (дата обращения: 09.06.2018). DOI 10.29222/ipng.2078–5712.2017–17.art8
13. Чеботарева И.Я. Методы трассировки лучей в эмиссионной сейсмической томографии// Физика земли. 2018. № 2. С. 12–24. DOI: 10.7868/S0002333718020023.
14. Чеботарева И.Я. Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры// Георесурсы. 2018. Т. 20. № 3. Ч. 2. С. 238–245. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.238–245>.
15. Chebotareva, I., Dmitrievsky, A., & Eremin, N. (2018, October 15). Nanoseismological Monitoring of Hydraulic Fracturing. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/191688–18RPTC–MS. ISBN 978–1–61399–648–5.
16. Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланюк И.Е. Концепция флюидного режима в верхней коре (гипотеза корового волновода)// Доклады РАН . 2000. Т. 374 . № 4. С 534–536.
17. Дмитриевский А.Н., Шустер В.Л., Пуланова С.А., Самойлова А.В. Моделирование геологического строения и механизмов формирования и размещения скоплений нефти и газа в доюрских комплексах западной Сибири // Актуальные проблемы нефти и газа. 2012. Вып. 2(6). 20 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru/> (дата обращения: 09.06.2018).
18. Чеботарева И.Я, Володин И.А. Критерий степени упорядоченности режимов автоколебаний для анализа динамики геофизической среды//Доклады РАН. 2010. Т.432. N1. С.115–119.
19. Чеботарева И.Я, Володин И.А. Метод локализации сейсмических источников, сигналы которых отличаются по степени упорядоченности от фонового шума// Доклады РАН. 2011. Т.437. N.3.