

## ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.982.2

### Оценка эффективности разработки месторождения нефти по его реакции на динамическое воздействие сейсмических волн

В.С. Дружинин<sup>а</sup>, О.А. Кусонский<sup>а</sup>, В.А. Силаев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН). 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100. E-mail: druvs@mail.ru, zavlab@arudaemon.gsras.ru

<sup>б</sup>ЗАО Институт развития организованных структур топливно-энергетического комплекса (РОСТЭК), г. Пермь. E-mail: inros95@mail.ru  
(Статья поступила в редакцию 12 октября 2013 г.)

Оценить текущее состояние разрабатываемого месторождения нефти, видимо, можно по отклику в нефтеотдаче пластов на динамическое воздействие сейсмических объёмных волн удалённых землетрясений. Нефтеотдача пластов месторождения, сохранившее свою единую гидродинамическую систему будет реагировать на воздействия объёмных сейсмических волн удалённых землетрясений.

Ключевые слова: *сейсмические волны, нефтеотдача пластов, гидродинамическая система месторождения*

Месторождение нефти представляет собой естественное скопление жидких углеводородов, приуроченное к одному или нескольким пластам-коллекторам с единой гидродинамической системой [9]. По новой концепции о геолого-геофизической среде, предложенной школой акад. М.А. Садовского и концепции предполагающей значительную роль глубинного фактора в генерации нефти и образовании месторождений [3], залежь можно представить в виде нелинейной модели, имеющей пространственно-временную структуру и обладающей свойствами, принципиально отличными от свойств в линейных моделях [8, 2]. Геолого-геофизическая нелинейная открытая среда месторождения эволюционирует под действием различных природных и техноген-

ных воздействий. Одним из таких воздействий является собственно разработка месторождения и влияние на него технических методов, которые применяются при добыче (в основном нагнетание в скважины воды для создания повышенного пластового давления). В основе механизма развития среды лежит нелинейная объёмная положительная обратная связь, обеспечивающая плавный рост во времени характерных параметров по всему пространству среды и наличие периодов сверхбыстрого нарастания процессов, когда характерные величины неограниченно возрастают за конечное время – так называемые «режимы с обострением» [5]. В конкретном случае при разработке месторождения можно предполагать наличие такой связи параметра нефтеотдачи пластов с

каждой точкой (элементарным объёмом) среды залежи, вмещающей её структуры и глубинных источников нефтяной провинции. Элементарные объёмы характеризуются определённым набором свойств. При оптимальной эффективной разработке месторождения, происходит обратимая структурная перестройка среды, неизбежно связанная с изменением общего объёма и формы соответствующей области среды. При этом можно ожидать квазистабильной нефтеотдачи пластов или плавный её рост, а также наличие «режимов с обострением» - резкого возрастания нефтеотдачи пластов за ограниченное время, обусловленное поступлением нефти из глубинных источников. При неэффективной разработке месторождения, когда в результате нагнетания в скважины избыточного количества воды происходят разрывы пластов и другие негативные явления, будет наблюдаться необратимая перестройка структуры среды месторождения, нарушение единой гидродинамической системы пластов-коллекторов, в результате чего перестанет существовать нелинейная объёмная обратная положительная связь параметра нефтеотдачи с каждой точкой среды месторождения. Следует ожидать деградацию нефтеотдачи пластов, уменьшение степени извлечения нефти из недр и увеличения величины остаточных запасов по сравнению с первоначальными геологическими запасами месторождения. Но и в этом случае, по-видимому, возможна релаксация среды с восстановлением общей гидродинамической системы резервуара месторождения при условии прекращения техногенного воздействия на неё (прекращение разработки месторождения) в течение какого-то конечного периода времени. После этого нефтеотдача пластов может вернуться к прежнему уровню что, например, наблюдалось на некоторых месторождениях в Чеченской республике.

Оценить текущее состояние разрабатываемого месторождения как открытой нелинейной по физическим свойствам и характеру протекающих динамических про-

цессов геолого-геофизической среды, по мнению авторов, можно по отклику пластов (нефтеотдаче) на динамическое воздействие на них энергии упругих объёмных сейсмических волн удалённых сильных землетрясений.

### Условия проведения исследований

По техническим и организационным причинам для исследований было взято небольшое месторождение нефти – Утулгинское, находящееся в ведении ЗАО «РОСТЭК», расположенное в непосредственной близости от крупного Красноярско-Куединского месторождения, принадлежащего ООО «Лукойл-Пермь» (Пермский край). Месторождение находится на Куединском валу Башкирского свода. Продуктивные пласты расположены в интервале глубин 1440–1450 м в пределах тульско-бобриновского горизонта нижне-средневизейского комплекса, сложенного мелкозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и карбонатов. Производительность скважин 6–40 т/сут. Суточная нефтеотдача пластов варьирует в пределах  $\pm 6\%$  от среднемесячного значения. Предполагается, что в случае эффективной разработки месторождения следует ожидать некоторой зависимости вариаций нефтеотдачи пластов от воздействия на них энергии объёмных сейсмических волн удалённых землетрясений.

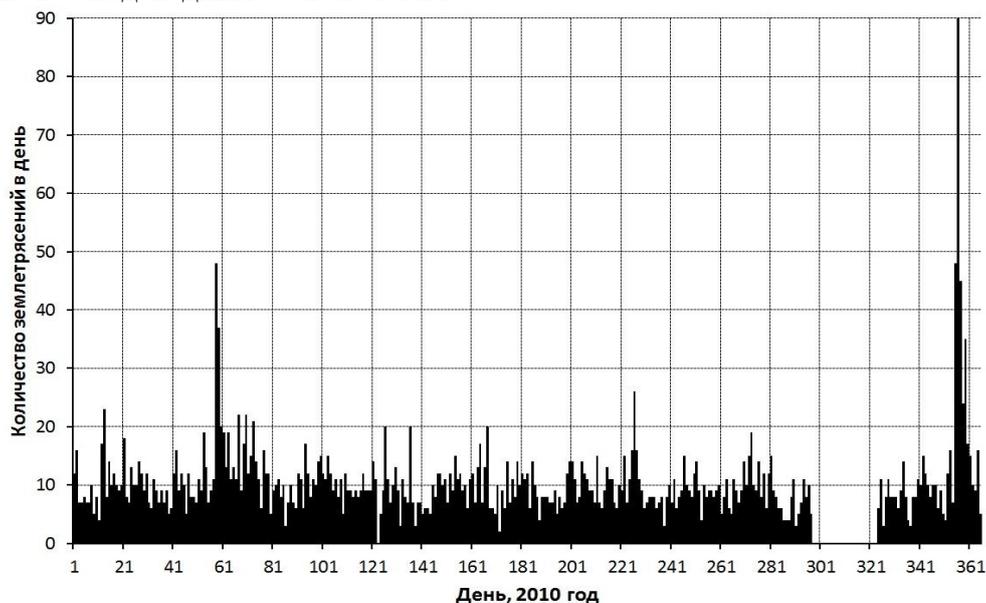
Анализировались показатели посуточного отбора нефти в течение 2010 г. в зависимости от энергии объёмных сейсмических волн удалённых землетрясений, зарегистрированных в течение суток. В работе используются оценочные величины энергии упругих объёмных сейсмических волн, которые достигли места залегающих нефтяных пластов. Методика оценки энергии упругих волн основывается на анализе записей процесса колебания грунта в месте расположения сейсмоприёмников. При обработке сейсмограмм применяется шкала магнитуд являющейся по существу энергетической шкалой [6].

Определение магнитуд удаленных землетрясений осуществлялась по сейсмограммам, полученным на сейсмостанции «Арти» расположенной на расстоянии около 150 км от анализируемого месторождения нефти. Сейсмостанция «Арти» (географические координаты  $56.429201^\circ$  с. ш.,  $E58.561369^\circ$  в. д.) размещена на восточной окраине Восточно-Европейской платформы (Предуральский краевой прогиб), в пределах которой залегает и исследуемое месторождение. В сейсмическом отношении район является слабоактивным. Здесь регистрируются отдельные слабые землетрясения до 2 – 3 штук в год. В связи с этим сделано допущение, что оценочные величины энергии упругих объёмных сейсмических волн от телесейсмических событий, регистрируемые на сейсмостанции «Арти», примерно будут равны энергии этих же волн в местах разработки месторождений. Суммарная энергия сейсмических волн, проходящих через месторождение за сутки принята равной сумме магнитуд зарегистрированных удалённых землетрясений в период с 0 по 24 час. UT. Магнитуды землетрясений получены в процессе обработки сейсмограмм на сейсмостанции «Арти», принятой в соответствии с инструкцией [4]. Они опубликованы в ежедекадных сейсмологиче-

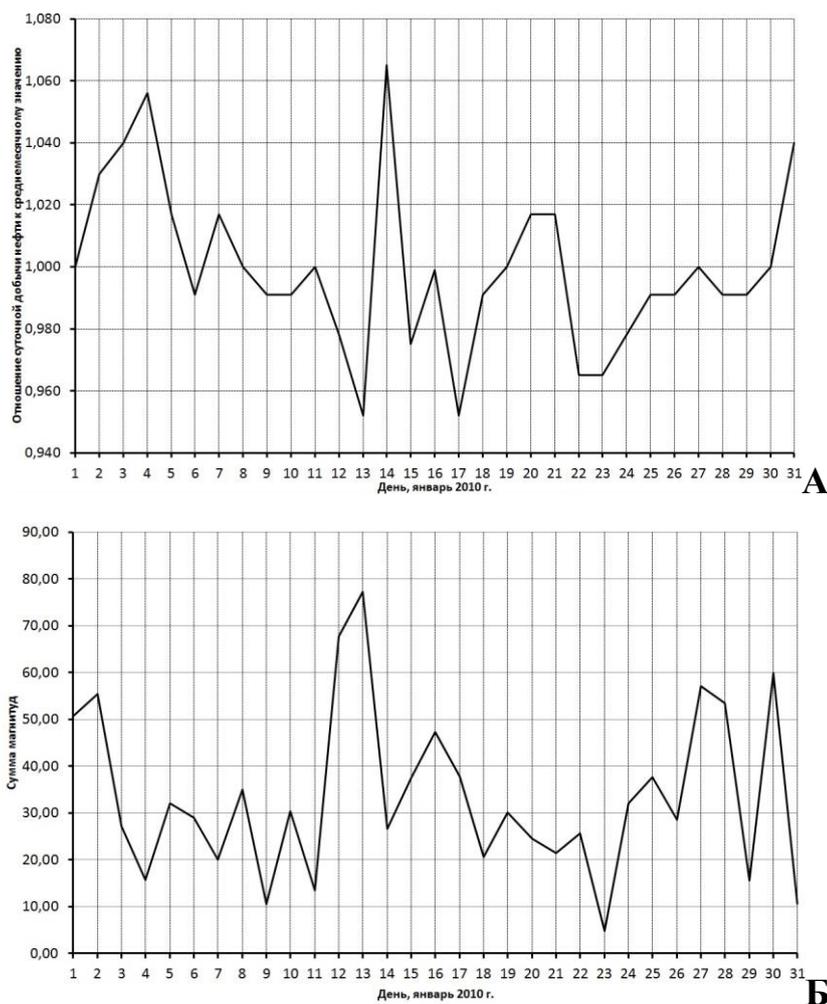
ских бюллетенях, выпускаемых Геофизической службой РАН.

Регистрация сейсмических волн проводилась с помощью сейсмостанции ARU IRIS/IDA, оснащённой широкополосными сейсмометрами STS-1V VBB Streckeisen и короткопериодными GS 13 Teledyne-Geotech. Сейсмометры размещены в специальном подземном сооружении на бетонном постаменте, который сооружен на поверхности прочных скальных пород - кварцевых песчаников. Это повышает чувствительность станции по регистрации относительно слабых удалённых сейсмических событий, что позволяет получить более полную картину по произошедшим землетрясениям и точнее оценить суммарную энергию сейсмических объёмных волн. Обработка сейсмограмм и определение магнитуды землетрясений проводилась на ПК с помощью программы WSG [7].

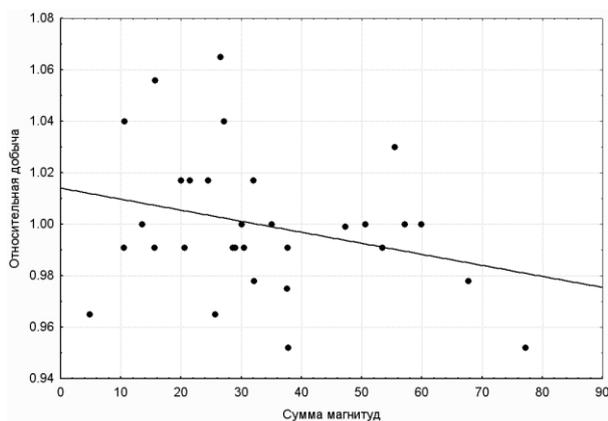
Сейсмостанция «Арти» ежедневно регистрирует от 3–8 до 22–46 и даже 90 удалённых землетрясений в день, имеющих магнитуду больше 3. Так в 2010 г. было зафиксировано 3579 таких землетрясений (рис. 1). Их эпицентры расположены в основном на Евро-Азиатском континенте.



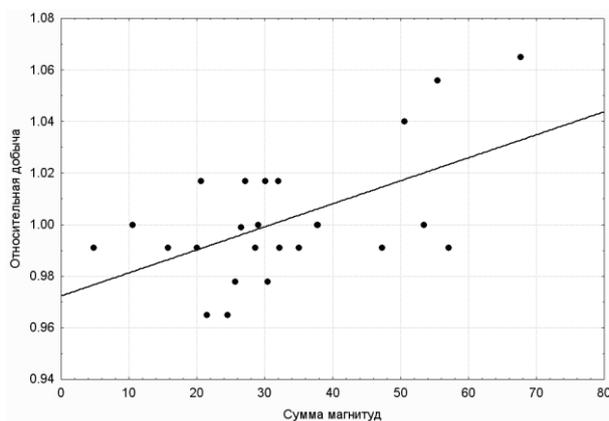
**Рис. 1.** Количество телесейсмических землетрясений, регистрируемых сейсмостанцией «Арти» в сутки в течение 2010 г.



**Рис. 2.** Сопоставление величины отношения суточной нефтеотдачи пластов к среднемесячному значению (А) и суммы магнитуд удалённых землетрясений за сутки (Б) в январе 2010 г.



**Рис. 3.** Корреляционное поле относительной нефтеотдачи пластов и энергетической характеристики (сумма магнитуд) удалённых землетрясений, зарегистрированных в тот же день



**Рис. 4.** Корреляционная зависимость относительной нефтеотдачи пластов, наблюдавшихся через два дня после регистрации удалённых землетрясений

Процесс генерации сейсмической энергии практически непрерывен во времени и носит вариационный характер. Энергия, которая переносится в земной коре упругими объёмными волнами, излучаемыми землетрясениями может быть огромной. Она оказывает воздействие на геолого-геофизическую среду месторождения по всему объёму.

Так, например, для рудников Верхне-Камского месторождения калийных солей установлена связь между уровнем сейсмической активности и удаленными землетрясениями [1].

Кроме динамического воздействия сейсмических колебаний от удалённых землетрясений пласты испытывают также влияние объёмных упругих волн сейсмических шумов, генерируемых геосредой. Сейсмические колебания шумов в тех же диапазонах частот, что и у сейсмических волн землетрясений регистрируются непрерывно. Амплитуда этих волн изменяется в широких пределах – от небольших по величине в спокойной среде и на несколько порядков больше в случае возникновения «сейсмических бурь». Сейсмические бури могут длиться несколько дней и хорошо идентифицируются на сейсмограммах. Суммарная суточная энергия сейсмических шумов, регистрируемая в точке наблюдения, соизмерима по величине с энергией сейсмических волн от удалённых землетрясений средней силы. В связи с этим, при анализе данных необходимо учитывать состояние поля сейсмических шумов.

### Результаты исследований

Получена зависимость величины суточной добычи нефти на месторождении Утулгинское от показателя энергии сейсмических волн - суммарной величины магнитуд удалённых землетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией «Арти» за сутки. При анализе зависимости в первом приближении использован математический аппарат, который применяется в случае линейных моделей – установление

корреляционных связей между двумя параметрами. Вариации суммарной величины магнитуд землетрясений находят отражение в графике отклонения суточной добычи нефти по сравнению со среднемесячным показателем.

Выявлены периоды времени, когда имело место чёткая зависимость увеличения суточной добычи нефти на месторождении наблюдавшаяся через 1 – 2 дня после возрастания значений энергетической характеристики сейсмических объёмных волн. А также периоды времени, где такая зависимость проявлялась слабее или вовсе не устанавливалась. В качестве примера приведём данные за январь 2010 г. (рис. 2).

Отмечается увеличение добычи нефти через 1 – 2 дня после возрастания энергетической характеристики (рис. 3, рис. 4). Так 1 – 2 января наблюдался рост энергетической характеристики до 55, затем 3 января отмечается её снижение до 30. На графике добычи нефти отмечается приращение показателя в период 3 – 4 января на 5.5%, затем падение в течение 5 – 6 января до 1% от среднемесячного уровня. С 4 по 11 января энергия регистрировалась примерно на уровне 14 – 24, а 12 января возросла до 70, и 13 января – до 80. На графике добычи нефти в период с 4 по 13 января наблюдалось снижение на 5%, а затем 14 января резкий рост на 6% от среднемесячного значения. Аналогичная картина приращения добычи через 1 – 2 дня после повышения регистрируемой энергии наблюдается и последующие дни января. Так повышение энергии отмечается с 23 по 30 января до 60, после чего 31 января наблюдается приращение добычи на 4%. Уравнение зависимости имеет вид:

$$y = 0.9724 + 0.0009x$$

где  $y$  – относительная суточная нефтеотдача пластов;  $x$  – сумма магнитуд удалённых землетрясений, зарегистрированных за сутки. Коэффициент корреляции 0.56.

Коэффициент корреляции 0.56 не высок, но вполне значим для такого процес-

са, т. к. на него накладывается техногенное воздействие на пласты, что может указать зависимость.

### Обсуждение результатов

На примере Утулгинского месторождения нефти было установлено, что вариация величины нефтеотдачи могут в определённые периоды времени зависеть от энергии упругих сейсмических колебаний удалённых сильных землетрясений и сейсмических бурь. В другие периоды такая связь ослабевает и затем вовсе не прослеживается. Объяснение этому факту можно дать, наделив геолого-геофизическую среду, в данном случае это продуктивные пласты нефти и вмещающие его геологические структуры, нелинейными свойствами. Благодаря нелинейности среды при определённых условиях имеет силу важнейший принцип - усиление флуктуаций. В эти периоды большое влияние на нефтеотдачу могут оказывать малые геофизические события, что было выявлено. Связь вариаций нефтеотдачи пластов с энергетической характеристикой объёмных сейсмических волн удалённых землетрясений развивается в январе 2010 г. ламинарно, затем прерывается статистически распределёнными промежутками нерегулярной связи и становится полностью хаотичной в феврале – марте 2010 г. В нелинейных системах такие переходы к хаосу обуславливаются универсальным механизмом генерации фликкер-шума или шума мерцания, которые исследованы многими авторами.

Можно сделать вывод, что открытая геологическая среда, включающая месторождение нефти находится в неустойчивом состоянии и продолжает развиваться через неустойчивость, через случайные влияния на неё геофизических факторов таких, например, как энергия сейсмических упругих колебаний землетрясений. Это может свидетельствовать о месторождении как о системе, сохранившей в процессе эффективной разработки единую пространственно-временную структуру. В

нашем случае, можно предположить, что объём добычи нефти, если технологию её извлечения из скважин не форсировать специальными способами, будет иметь длительную квазистационарную стадию (с медленным монотонным ростом величины добычи). С наступлением конечного промежутка времени, в течение которого действие малого геофизического возмущения резко возрастёт, благодаря нелинейной положительной обратной связи, будет наблюдаться сверхбыстрый (гиперболический) рост показателя добычи – «режим с обострением». Тем самым на месторождении в будущем можно ожидать значительного повышения нефтеотдачи пластов.

### Заключение

Выполненные в ограниченном объёме исследования показали, что вариации показателя отбора нефти на Утулгинском месторождении (Пермский край) предположительно можно рассматривать в качестве тензочувствительного элемента к воздействию на геологическую структуру и продуктивные пласты геофизических факторов, таких как сейсмические объёмные волны от удалённых землетрясений. Геологическая структура месторождения находится в неустойчивом состоянии, здесь сохранилась единая гидродинамическая система пластов и подводящих глубинных каналов. Месторождение продолжает развиваться. Здесь можно ожидать существенного повышения нефтеотдачи пластов за счёт поступления нефти из глубинных источников. Работы следует продолжить на крупном месторождении нефти с корректировкой временного интервала отбора и учёта воздействий технологического плана. Представляет интерес анализ времени запаздывания (реакции пласта на воздействие сейсмических волн) в разных частях крупного месторождения и одновременно с Утулгинским с целью выяснения природы этого явления и наличия возможных каналов связи

месторождений с едиными глубинными источниками нефтяной провинции.

Работа выполнена при федеральной поддержке Уральского отделения РАН: проекты 12-И-5-2067, 12-Т-5-1018.

### Библиографический список

1. *Белевская М.А., Верхоланцев Ф.Г.* Удалённые землетрясения как фактор, влияющий на сейсмическую активность в подработанном соляном массиве // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных / Материалы Четвертой Международной сейсмологической школы. Листвянка, 2009 – Обнинск: ГС РАН, 2009. С. 30-34*
2. *Гольдин С.В.* Физика «живой» Земли // *Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. С. 17-35.*
3. *Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю.* Региональный прогноз на поиски месторождений углеводородов с учётом специфики строения верхней части литосферы Уральского региона // *Разведка и охрана недр, 2013. № 1. С. 33-41.*
4. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука, 1981. 272 с.
5. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Особенности неравновесных процессов в открытых диссипативных средах // *Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. С. 37-65.*
6. *Кондорская Н.В., Соловьёв С.Л.* Общее состояние вопроса определения магнитуды и энергетической классификации землетрясений в практике сейсмических наблюдений // *Магнитуда и классификация землетрясений. Сборник статей в двух томах. Т. 1. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, 1974. С. 13-42.*
7. *Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П.* Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77-83.*
8. *Николаев А.Н.* Черты геофизики XXI века // *Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. С. 7-16.*
9. Правила разработки нефтяных и газонефтяных месторождений. Утверждены Коллегией Министерства нефтяной промышленности СССР (протокол от 15 октября 1984 г., № 44, п. IV).

## Evaluation of the Effectiveness of Oil Deposit Exploitation Based on its Response to Dynamic Impact of Seismic Waves

**Druzhinin V.S<sup>a</sup>, O.A. Kusonkiy<sup>a</sup>, V.A. Silayev<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IGF UB RAS). 620016, Yekaterinburg, Amundsen Str., 100. E-mail: druvs@mail.ru, zavlab@arudaemon.gsras.ru

<sup>b</sup>Institute of development of organized enterprises of energy complex (ROSTEK), Perm, Russia  
E-mail: inros95@mail.ru

We have studied the feasibility of assessment the current state of the oil field under development using the response of the oil recovery to dynamic effect of seismic body

waves from distant earthquakes. Preliminary results of comparison the seismic activity and oil production showed that oil field, as a single hydrodynamic system, might respond to the impact of seismic body waves from distant earthquakes.

Keywords: *seismic waves, oil recovery, deposit hydrodynamic system*

## References

1. *Belyaevskaya M.A., Verkholtantsev F.G.*, 2009. Udalennye zemletryaseniya kak factor vliyayushchiy na seysmicheskuyu aktivnost v podrobotannom solyanom massive [Distant earthquakes as the factors inducing seismic activity of the underworked salt rock massif]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy Chetvertoy Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly*, Listvyanka. Obninsk, GS RAS, pp. 30-34.
2. *Goldin S.V.*, 2003. Fizika "zhivoy" Zemli [Physics of the "live" Earth]. In *Problems of geophysics of XXI century*. Moscow, Nauka, pp. 17-35.
3. *Druzhinin V.S., Martyshko P.S., Nachapkin N.I., and Osipov V.Yu.*, 2013. Regionalniy prognoz na poiski mestorozhdeniy uglevodorodov s uchetom spetsifiki stroeniya verkhney chasti litosfery Uralskogo regiona [Regional forecast for hydrocarbon deposits exploration in consideration of the structural specifics of upper part of lithosphere of Urals region]. *Razvedka i okhrana neдр. 1*: 33-41.
4. *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Edinoy systemy seysmicheskikh nablyudeniy SSSR* [Guide on routines of conduction and processing of observations at seismic stations of the United System of Seismic Observation of USSR], 1981. Moscow, Nauka, p. 272.
5. *Knyazeva E.N., Kurdyumov S.P.*, 2003. Osobennosti neravnovesnykh protsessov v otкрыtykh dissipativnykh sredakh [Particularities of nonequilibrium processes in the open dissipative medium]. In *Problemy geofiziki XXI veka*. Moscow, Nauka, pp. 37-65.
6. *Kondorskaya N.V., Solovyev S.L.*, 1974. Obshchee sostoyanie voprosa opredeleniya magnitudy i energeticheskoy klassifikatsii zemletryaseniya v praktike seysmicheskikh nablyudeniy [The general state of problem of determination of magnitude and energy earthquake classification in the practical seismic observation]. In *Magnituda i klassifikatsiya zemletryaseniya*. T. 1. Moscow, Institut Fiziki Zemli AN SSSR, pp. 13-42.
7. *Krasilov S.A., Kolomiets M.V., and Akimov A.P.*, 2006. Organizatsiya protsessa obrabotki tsifrovyykh seysmicheskikh dannykh s ispolzovaniem programmnoy kompleksa WSG [Management of seismic digital data processing using software complex WSG]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly*. Obninsk, GS RAN, pp. 77-83.
8. *Nikolayev A.N.*, 2003. Cherty geofiziki XXI veka [Aspects of geophysics of XXI century]. In *Problemy geofiziki XXI veka*. Moscow, Nauka, pp. 7-16.
9. *Pravila razrabotki neftnyanykh i gazoneftnyanykh mestorozhdeniy* [Regulations on the development of oil and gas-oil deposits]. Utkverzhdeny Kollegiyey Ministerstva neftyanoy promyshlennosti SSSR (protocol ot 15 oktyabrya 1984 g. № 44, p. IV).

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук Б.А. Спасский