

УДК 550.34; 519.688; 504.5.06

**ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ УГЛЕВОДОРОДНОГО
КОЛЛЕКТОРА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ ЗАШУМЛЕННОСТИ**

И. Я. Чеботарева

*Институт проблем нефти и газа РАН,
E-mail: irinache@inbox.ru, ул. Губкина, 3, 119333, г. Москва, Россия*

Предложен экологичный метод дистанционной оценки продуктивности углеводородного коллектора с использованием записей естественного сейсмического фона Земли. Количественная оценка проводится с помощью термодинамического индикатора состояния горных пород, разработанного на базе энтропии Климонтовича. Последняя является корректной мерой степени неравновесности состояния для открытых систем и может быть измерена по степени хаотичности/упорядоченности колебаний, генерируемых системой. Выявлена линейная зависимость значений термодинамического индикатора от суммарной толщины продуктивных слоев в скважинах. Сильный техногенный и естественный шум может искажать результат дистанционной оценки. Разработан новый алгоритм, устойчивый к появлению высокоамплитудной помехи. Термодинамический индикатор обеспечивает возможность построения карт продуктивности на месторождениях углеводородов и выбор наиболее перспективных точек для бурения скважин.

Сейсмический фон, горные породы, нефть, газ, сейсмическая эмиссия, энтропия Климонтовича, термодинамический индикатор

DOI: 10.15372/FTPRPI20220303

Верхняя часть земной коры является сложным нелинейным фильтром. Проходящие через горные породы сигналы различной физической природы содержат сведения не только об источнике, но и о параметрах среды, при распространении через которую происходит их линейная и нелинейная трансформация. Если рассматривать Землю и околоземное пространство как систему оболочек [1, 2], то энергетика волновых полей коры Земли обеспечивается за счет внутренних геосфер — мантии и ядра и внешних — атмосферы, ионосферы, магнитосферы, гелиосферы. Земная кора — открытая нелинейная система, расположенная на пути встречных потоков энерго- и массообмена между внутренними и внешними геосферами. При взаимодействии потоков с горными породами изменениям подвергаются как внешние потоки, так и вмещающие горные породы. С одной стороны, это приводит к скоплению и отложению минерального вещества внутри коры Земли с образованием месторождений полезных ископаемых разного генезиса и состава, с другой — к диссипации энергии потоков в виде фоновых полей различной физической природы. Одно из таких полей — естественный сейсмический шум Земли

(сейсмический фон). Он регистрируется в широком диапазоне частот повсеместно, на поверхности и во внутренних точках коры Земли. Записи сейсмического фона на поверхности вдали от мощных источников акустических колебаний выглядят как случайные флуктуации и могут содержать слабую пространственно-когерентную составляющую глубинного происхождения.

Во второй половине XX в. началось активное изучение эндогенной составляющей высокочастотного (> 1 Гц) сейсмического фона — сейсмической эмиссии. Сначала ее изучение проводилось с помощью единичных регистраторов по поверхностным и скважинным наблюдениям, затем — с помощью многоканальных площадных сейсмических групп методом эмиссионной сейсмической томографии [3–8]. Установлено, что источники сейсмической эмиссии связаны с зонами природной трещиноватости, с разломами и большими трещинами, с фильтрацией флюида и сильными термическими градиентами. Амплитуда эмиссионного излучения модулируется различными низкочастотными деформационными процессами, такими как лунно-солнечные приливы, штормовые микросейсмы, волны от удаленных сильных землетрясений и взрывов, собственные колебания Земли и пр. С уверенностью можно утверждать, что существуют множественные механизмы генерации сейсмической эмиссии. Они связаны не столько с разрушением пород, сколько с фрикционными проявлениями и нелинейной трансформацией энергии волнового сейсмического поля в структурно неоднородных объемах среды.

Важная роль в формировании особенностей сейсмического фона состоит в том, что горные породы являются многомасштабной иерархической блочной структурой [9, 10]. Связанная с этим неоднородность упругих и прочностных свойств во многом обуславливает высокую тензочувствительность пород и акустическую нелинейность даже при умеренных динамических воздействиях [11–17]. В объемах пород с ярко выраженными нелинейными свойствами, в зависимости от состояния среды и энергии внешнего воздействия, возможна генерация различных режимов колебаний (от регулярных до сложных хаотических и стохастических). Яркий пример — режимы сейсмического фона, наблюдаемые на протяжении 32 сут после разрушительного Газлийского землетрясения 19.03.1984 г. [5]. Вместо обычных фоновых шумоподобных колебаний появлялись и исчезали длительные гармонические и двухчастотные колебания, колебания с регулярно перемежающимися частотами, а также другие сложные колебательные режимы. В несейсмических районах на поверхности сейсмическая эмиссия обычно является слабой аддитивной составляющей фоновых колебаний. Однако экспериментальные исследования показали, что она существенно меняет структуру высокочастотного сейсмического фона. Это позволяет изучать источники эмиссии, локализовать их положение и прослеживать временную динамику.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ИНДИКАТОРА

Ранее предлагался метод контроля состояния горных пород по записям сейсмического фона — термодинамический индикатор состояния геосреды *TI*. Он позволяет отслеживать во времени и пространстве активизацию эндогенных геофизических процессов по изменению параметров фоновых полей. По сравнению с эмиссионной сейсмической томографией метод гораздо более дешевый и простой в реализации, так как использует одноканальную регистрацию, и весь необходимый набор данных может быть собран с помощью одного регистрирующего прибора. Разработанные методики [8, 18, 19] позволили установить, что существует сходство в поведении термодинамического индикатора при развитии процессов разрушения для различных энергетических масштабов события (сильное землетрясение, гидравлический

разрыв пласта, микроразрушения при трехмерном нагружении керна). Разрушения происходят на фоне самоорганизации, индикатором которой является увеличение степени упорядоченности акустических колебаний на некотором временном интервале в окрестностях момента разрушения. Значение временного интервала зависит от энергии события [8].

На рис. 1а показано поведение TI во время гидроразрыва пласта на нефтяном месторождении. Полоса частот регистрации 4–50 Гц. До начала работ TI флуктуирует около постоянной величины — нормы упорядоченности фоновых колебаний. На начальном этапе закачки жидкости и росте напряжений в массиве пород наблюдается увеличение значений TI , что отражает рост хаотизации фоновых сейсмических колебаний. Разрушение пород с образованием трещины гидроразрыва происходит на фоне сильного всплеска упорядоченности фоновых колебаний (отклонение TI в сторону отрицательных значений). Формирование аномалии с уменьшением значений TI начинается за некоторое время до разрушения, а после разрушения наблюдается смена тенденции — изменение TI в направлении увеличения значений. Во время проведения полевых работ новая норма хаотизации не успевает установиться, но можно предположить, что значения TI при новой норме уменьшатся, т. е. новое состояние будет более неравновесным и более активным, чем до проведения работ. Это является целью проведения гидроразрыва.

Наблюдаемый характер изменения степени упорядоченности состояния природного массива можно описать в терминах модели лавинно-неустойчивого трещинообразования [20]. Интервал роста хаотизации соответствует первой стадии — накоплению небольших трещин во всем объеме, с прорастанием подготовленных трещин и разрастанием области деструкции, что ведет к увеличению степеней свободы и росту энтропии. Медленный рост упорядоченности соответствует второй стадии — самоорганизации трещин, кластеризации и укрупнению трещин за счет взаимодействия их полей напряжений по достижении критической плотности. Резкий всплеск упорядоченности соответствует третьему этапу — лавинному развитию самоорганизации, формированию эшелона крупных трещин, трассирующих будущий макроразрыв. Затем происходит релаксация с частичным возвратом к прежнему напряженно-деформированному состоянию.

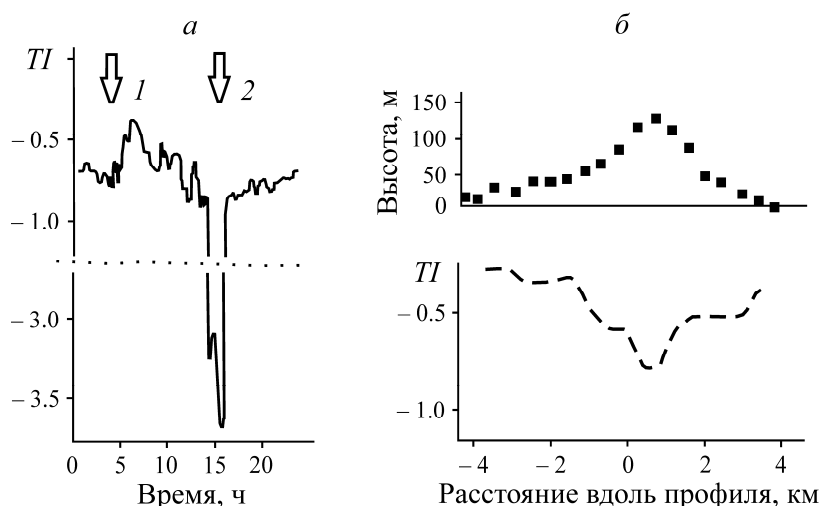


Рис. 1. Эволюция термодинамического индикатора TI во времени при проведении гидравлического разрыва пласта (а) и по площади при локализации грязевулканической камеры грязевого вулкана (б): 1 — начало работ; 2 — момент образования трещины гидроразрыва. На рис. 1б сверху показано расположение регистрирующих датчиков

Термодинамический индикатор используется для контроля состояния среды не только во времени, но и в пространстве. На рис. 1б показано изменение значений TI по профилю через грязевой вулкан. Наиболее неравновесное состояние среды наблюдается над грязевой камерой вулкана [19]. Известно, что грязевой вулканизм связан с притоком углеводородных газов, поднимающихся по глубинным разломам и зонам повышенной проницаемости. Его ареал коррелирует с положением крупных нефтегазоносных бассейнов [21]. В [22] с использованием геологических и 3D-сейсморазведочных данных обоснован вывод о том, что формирования грязевого вулканизма и нефтегазовых месторождений парагенетически связаны и синхронны во времени и пространстве. Такая связь наталкивает на мысль о том, что термодинамический индикатор должен быть чувствительным и к насыщению пород углеводородами.

Экспериментальные результаты настоящей работы показывают возможности термодинамического индикатора для изучения параметров углеводородной залежи. Особенность сейсмического фона на территории разрабатываемых месторождений состоит в наличии интенсивного шума. В некоторых случаях он обусловлен природными источниками (сейсмическими волнами от сильных удаленных землетрясений и от близких тектонических подвижек, внезапных приближений крупных животных). В других случаях помехи объясняются техногенной активностью, связанной с появлением автомобилей, вертолетов, самолетов, присутствием промышленного оборудования. Высокоамплитудная помеха существенно искажает результаты. Предлагается новый алгоритм расчета термодинамического индикатора, позволяющий успешно работать при сильной зашумленности сейсмических записей.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Алгоритм расчета термодинамического индикатора базируется на S -теореме Климонтовича [23]. Известно, что среди всех термодинамических функций именно энтропия Больцмана–Гиббса — корректная мера хаотичности состояния макроскопических систем. Согласно H -теореме Больцмана, в процессе эволюции в замкнутой системе к равновесному состоянию энтропия системы возрастает и остается неизменной при достижении равновесного состояния, т. е. для консервативной системы, средняя энергия которой постоянна, относительной мерой неравновесности (мерой хаотичности) состояния является разность энтропий:

$$\Delta S = S(t) - S_0 = \int F_0 \ln F_0 dx - \int F \ln F dx \leq 0,$$

где $F_0(x)$, $F(x, t)$ — функция распределения вероятности равновесного и неравновесного состояния системы соответственно.

S -теорему Климонтовича можно рассматривать в качестве обобщения H -теоремы Больцмана на случай открытых систем. S -теорема утверждает, что для сравнения двух состояний открытой системы энтропию наиболее хаотичного состояния надо перенормировать так, чтобы средние энергии двух выделенных состояний стали равными. Эта теорема описывает алгоритм выбора наиболее хаотичного состояния и алгоритм перенормировки энтропии. Подробно все детали, связанные с S -теоремой, изложены в [23], алгоритм работы с экспериментальными данными — в [8, 18, 23]. Коротко идея состоит в следующем. Пусть измеряемый параметр системы $X(t, a)$ зависит от внешнего управляющего параметра a и времени t . В замкнутых системах любое неравновесное состояние эволюционирует к равновесному, наиболее хаотичному, при этом энтропия системы может только возрастать. В открытых системах возможны стационарные неравновесные состояния и энтропия системы может как возрастать, так и уменьшаться. Пусть параметр a_0 соответствует наиболее хаотичному из выделенных состояний.

Тогда любое другое состояние $X(t, a_0 + \Delta a)$ будет менее хаотичным (более упорядоченным, более неравновесным), чем $X(t, a_0)$. По измеренным функциям $X(t, a)$ различным способом можно построить эмпирические распределения $F(X, a)$. Функцию распределения $F(X, a)$ запишем в виде канонического распределения Гиббса:

$$F(X, T_{eff}, a) = \left(\frac{1}{Z(T_{eff}, a)} \right) \exp \left(\frac{H_{eff}(X, a)}{T_{eff}} \right), \quad \int F dX = 1.$$

Здесь H_{eff} — эффективная функция Гамильтона; $T_{eff}(\Delta a)$ — эффективная температура; Z — интеграл состояния, вычисляемый из условия нормировки. Согласно [23], для $a = a_0$ эффективная функция Гамильтона $H_{eff} = -\ln(F(X, a_0))$ и эффективная температура $T_{eff} = 1$. Чтобы корректно сравнить степени упорядоченности двух выделенных состояний $X(t, a_0)$ и $X(t, a_0 + \Delta a)$, средние значения эффективных функций Гамильтона для этих состояний должны быть одинаковы. Проводится перенормировка функций распределения наиболее хаотичного состояния F_0 за счет изменения эффективной температуры. Для оценки перенормированной функции F_0^* и расчета относительной степени упорядоченности текущего состояния $F(a)$ используют следующие уравнения [23]:

$$F_0^* = \left(\frac{1}{Z(T_{eff}, a_0)} \right) \exp \left(\frac{H_{eff}(X, a_0)}{T_{eff}(\Delta)} \right), \quad \int F_0^* dX = 1,$$

$$\int H_{eff} F_0^* dX = \int H_{eff} F(a) dX,$$

$$\Delta S^* = S(a) - S_0^* = \int F_0^* \ln F_0^* dX - \int F(a) \ln F(a) dX \leq 0.$$

Термодинамический индикатор состояния среды по сути является энтропией Климонтовича ($TI = \Delta S^*$) для функций распределения, рассчитанных по мгновенным амплитудам записей естественного сейсмического фона Земли, зарегистрированным на поверхности.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Анализировались полевые данные и геофизическая информация, предоставленные Marmot Passive Monitoring Technologies SA [24]. Работы проводились на месторождении углеводородов в Объединенных Арабских Эмиратах с помощью высокочувствительных широкополосных сейсмометров Marmot Signal Converter чувствительностью 30 000 Вс/м. Частота опроса 100 Гц. Изучались записи сейсмического фона в шести точках. Пять точек регистрации располагались над продуктивной залежью, одна — вблизи сухой скважины. Пять записей над продуктивной залежью сделаны почти одновременно, разница во времени регистрации не превышала двух недель. Запись около сухой скважины сделана двумя месяцами позже. Так как скважина сухая, процесс разработки не повлиял на состояние среды в точке регистрации. Сейсмические записи имели разную длину. Длина записи около сухой скважины составляла 2400 с, остальные записи имели длину 5400 с. На некоторых участках записей присутствовал высокоамплитудный шум. Из всех записей сформировали три набора данных. Набор 1 имел длительность записей 800 с, для него выбирались участки записей с наименьшим техногенным и природным шумом

для всех точек регистрации. Длинные записи делились пополам. Длительность записей наборов 2 и 3 составляла 2400 с. В каждый набор входила запись около сухой скважины и одна из половин длинных записей у продуктивных скважин. В качестве оценки локальной продуктивности использовался параметр NPZ , который оценивался следующим образом. По данным стандартного каротажа, в близрасположенных скважинах выделялись продуктивные интервалы, затем параметр NPZ рассчитывался как суммарная толщина продуктивных интервалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете термодинамического индикатора в качестве функции распределения $F(X, a)$ выбрана оценка спектра мощности фоновых колебаний $P(f, t, \bar{\rho})$, где f — частота колебаний, t — время, $\bar{\rho}$ — координаты точки регистрации. По сути, $P(f, t, \bar{\rho})$ — оценка распределения энергии фоновых колебаний по частоте в выбранной точке регистрации и в окрестности выбранного момента времени. В зависимости от ситуации в качестве управляющего параметра может выступать как параметр t , так и $\bar{\rho}$. При расчете спектров использовалось быстрое преобразование Фурье с весовым окном Хеннинга во временной области. Для уменьшения дисперсии спектральной оценки делалось усреднение по трем соседним окнам с 50 %-м перекрытием сегментов, что существенно уменьшало статистический разброс и наиболее полно сохраняло информацию о деталях процесса [25]. Максимальная разница во времени регистрации для всех точек над продуктивной залежью составила около двух недель. При разработке месторождения состояние среды за такой срок не должно сильно измениться.

Известно, что в сейсмическом фоне в диапазоне 0.40–0.06 Гц доминируют микросейсмы, связанные со штормовой активностью. В зависимости от погодных условий амплитуда этой составляющей фона может возрастать более чем на порядок в течение нескольких часов [26]. Чтобы убрать влияние неконтролируемого фактора на результат, перед расчетом спектров низкочастотная составляющая сейсмического фона ниже 1 Гц подавлялась с помощью фильтра Баттерворта. На рис. 2 показаны частотные спектры для разных точек регистрации.

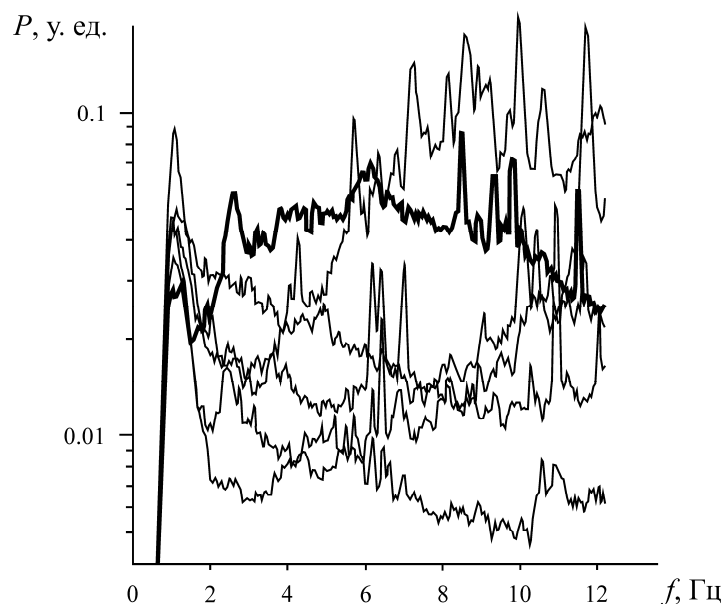


Рис. 2. Спектры мощности сейсмического фона $P(f)$ в разных точках регистрации. Жирная линия — спектр для сухой скважины

Иногда на записях появляется нестационарный высокоамплитудный шум от природных и промышленных источников, имеющий различный частотный состав. В наших данных этот шум преобладает на частотах более 8–10 Гц и проявляется в виде множественных острых пиков. Спектр в диапазоне 1–6 Гц гораздо более гладкий. Большинство точек регистрации анализируемого набора данных расположено вблизи продуктивных скважин. Из визуального анализа спектров следует, что нельзя сформулировать простое правило для различения сухой и продуктивных скважин на базе параметров пиков в низкочастотной части спектров. Явные максимумы, связанные с насыщением пород углеводородами, в спектре сейсмического фона на частотах 1–10 Гц не видны, вероятно потому, что глубинный эмиссионный сигнал слишком слабый. Однако термодинамический индикатор позволил выявить наличие эффекта и даже количественно оценить потенциал продуктивности в каждой точке регистрации.

При расчете термодинамического индикатора по стандартной методике [8, 18–19] действовали следующим образом. Для каждой сейсмической записи определялся в скользящем окне наиболее хаотичный интервал по алгоритму S -теоремы Климонтовича. Среди этих интервалов по тому же алгоритму выбирался самый хаотичный как базовый для оценки перенормированной энтропии $\Delta S^*(t, \bar{\rho})$. Значение термодинамического индикатора в каждой точке определялось как медиана мгновенных значений, рассчитанных по соответствующей записи сейсмического фона в скользящем окне $TI(\bar{\rho}) = \text{median}(\Delta S^*(t, \bar{\rho}))$. Статистический разброс TI — среднее абсолютных отклонений от медианы в большую и меньшую сторону.

На рис. 3 представлены в зависимости от локальной продуктивности значения термодинамического индикатора и связанных с ним параметров, рассчитанные по набору 1 сейсмических записей, с наименьшим техногенным шумом. В расчете использован диапазон частот 1–6 Гц.

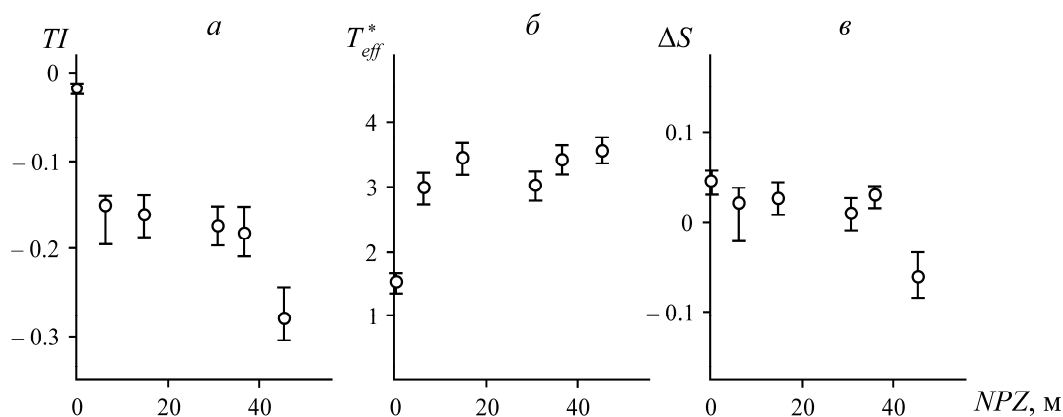


Рис. 3. Результаты расчета зависимости от параметра продуктивности NPZ термодинамического индикатора и связанных с ним параметров для набора данных 1: a — термодинамический индикатор TI ; b — эффективная температура T_{eff}^* ; c — энтропия Больцмана ΔS . Положению сухой скважины соответствует $NPZ=0$

На рис. 3а показана зависимость для термодинамического индикатора $TI(NPZ)$. Точка с $NPZ=0$ соответствует положению сухой скважины. Видно, что значение TI для сухой скважины весьма отличается от значений TI для продуктивных скважин. Более того, зависимость $TI(NPZ)$ монотонная. Принимая во внимание тот факт, что оценка продуктивности NPZ изме-

ряется экспериментально, т. е. с некоторой погрешностью, можно предположить, что зависимость $TI(NPZ)$ близка к линейной. На рис. 3б представлена зависимость для эффективной температуры $T_{eff}^*(NPZ)$. Физический смысл эффективной температуры $T_{eff}^*(\Delta a)$ заключается в том, что она указывает насколько надо повысить температуру наиболее хаотичного состояния, чтобы выровнять средние эффективные энергии двух сравниваемых состояний. Видно, что изменения в состоянии среды от точки к точке отражаются в значениях T_{eff}^* . И хотя T_{eff}^* показывает неоспоримое различие между сухой и продуктивными скважинами, различия T_{eff}^* для скважин с разной продуктивностью не слишком четкие. Для энтропии Больцмана на рис. 3в вообще отсутствует четкая закономерность в поведении для разных точек регистрации. Зависимость $\Delta S(NPZ)$ слабо выражена и не является монотонной. Эти экспериментальные результаты подтверждают теоретические выводы [23] о том, что среди макроскопических функций только энтропия Климонтовича, а следовательно, и термодинамический индикатор являются корректной количественной оценкой сравнительной степени упорядоченности (хаотичности) при статистическом описании процессов в макроскопических системах.

На рис. 4 приведены зависимости $TI(NPZ)$ для наборов 1, 2 и 3 сейсмических данных. Если для набора 1 выбраны наименее зашумленные записи, то наборы 2 и 3 содержат записи, осложненные высокоамплитудной помехой. Для набора 3 деструктивное влияние помехи настолько велико, что не удастся правильно определить точку с наиболее хаотичным состоянием геологической среды. По набору 1 и 2 такое наиболее хаотичное состояние регистрируется вблизи сухой скважины (рис. 4а, б). Ошибка, возникающая для набора 3, связана с появлением на записи высокоамплитудного широкополосного шума. Чтобы исправить ситуацию опробован новый алгоритм обработки сейсмических данных, давший хорошие результаты.

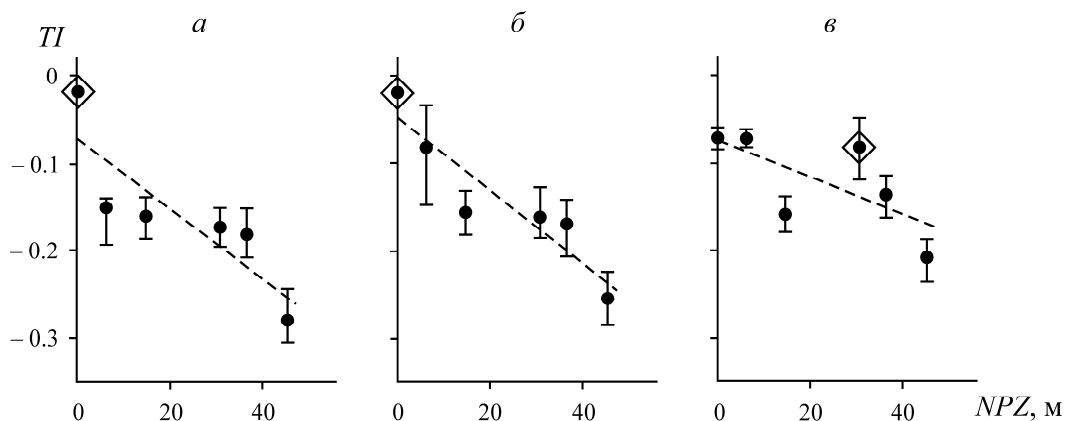


Рис. 4. Зависимость термодинамического индикатора TI от параметра продуктивности NPZ при старом алгоритме расчета для набора данных 1 (а), 2 (б) и 3 (в): ромбик — результат для точек наблюдения, которые алгоритм определяет как наиболее хаотичное состояние; штриховая линия — регрессионная зависимость, рассчитанная методом наименьших квадратов

На рис. 5 показаны зависимости $TI(NPZ)$ для наборов 1, 2 и 3 при использовании нового подхода. Видно, что результат существенно улучшился. Для всех наборов данных правильно определяется сухая скважина как точка регистрации с наиболее хаотичным (наиболее равновесным) состоянием среды. Наклон регрессионных прямых примерно одинаков для всех наборов данных.

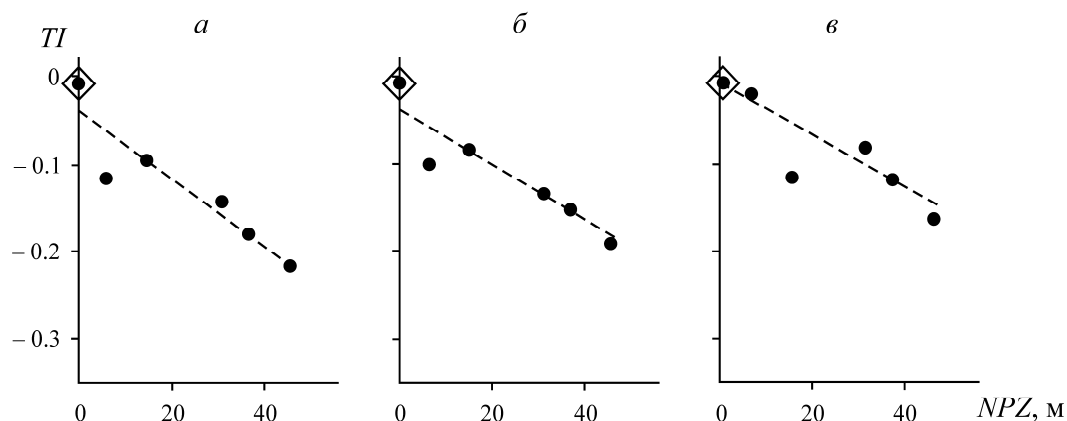


Рис. 5. Зависимость термодинамического индикатора TI от параметра продуктивности NPZ при новом алгоритме расчета для набора данных 1 (а), 2 (б) и 3 (в): ромбик — результат для точек наблюдения, которые алгоритм определяет как наиболее хаотичное состояние; штриховая линия — регрессионная зависимость, рассчитанная методом наименьших квадратов

Суть нового алгоритма обработки данных состоит в следующем. Высокоамплитудный природный и техногенный шум может проявляться во всем диапазоне частот, но его частотный состав и амплитуда не стабильны во времени. Считаем, что в каждой точке регистрируемый сигнал является аддитивной суммой сейсмического фона, несущего полезную информацию, и высокоамплитудного шума, служащего помехой. Для каждой точки регистрации можно сформировать минимальный спектр. Выберем для каждой частоты наименьшее по времени значение $P_{\min}(f, \bar{\rho}) = \min(P(f, t, \bar{\rho}))$. Если $P_{\min}(f, \bar{\rho})$ использовать в качестве локальной функции распределения для расчета термодинамического индикатора, то с большой вероятностью удастся избавиться от нестационарной высокоамплитудной техногенной помехи. Предположим, что $P_{\min}(f, \bar{\rho})$ содержит в основном полезную информацию и является суммой спектров глубинного эмиссионного излучения и случайных поверхностных осцилляций. Среди этих минимальных спектров выберем наиболее хаотичный по алгоритму S -теоремы Климонтовича, затем относительно него рассчитаем значения термодинамического индикатора для остальных точек регистрации. Судя по результатам, новый подход хорошо сработал (рис. 5). Для всех трех наборов данных правильно определяется сухая скважина как точка регистрации с наиболее хаотичным состоянием среды. Значения термодинамического индикатора для продуктивных скважин ложатся более компактно относительно регрессионной линейной зависимости $TI = a + b \cdot NPZ$.

Ниже приведены максимальный разброс $|b_{\max} - b_{\min}|$ и средняя стандартная ошибка для параметра b ($\sigma_b = (\sigma_{b1} + \sigma_{b2} + \sigma_{b3})/3$), рассчитанные по трем наборам сейсмических записей для нового и старого алгоритмов:

Тип алгоритма	$ b_{\max} - b_{\min} $	σ_b
Старый	0.001996	0.001038
Новый	0.000763	0.000765

Разброс оценки b при использовании нового алгоритма в 2.6 раза меньше, т. е. лежит в пределах стандартной ошибки, в то время как при использовании старого алгоритма из-за влияния высокоамплитудной помехи разброс оценки b в 2 раза превышает стандартную ошибку. На рис. 5, в отличие от рис. 4, не указана погрешность измерения TI . Это связано с тем, что

при использовании старого алгоритма в каждой точке регистрации TI вычислялся как медиана временной выборки значений TI по всей записи в скользящем временном окне. Ошибки рассчитывались с учетом всей выборки TI , как среднее отклонений от медианы в сторону больших и меньших значений. При использовании нового алгоритма в каждой точке регистрации получали только одно значение минимального спектра сейсмического фона $P_{\min}(f, \bar{\rho})$ и, следовательно, только одно значение TI . По одному значению ошибку оценить нельзя. Качество оценки состояния горных пород для нового метода улучшается, результат становится более устойчивым по отношению к сильной помехе, но теряется возможность расчета ошибки для TI (рис. 5).

Выявленная зависимость степени неравновесности состояния геологической среды от локальной продуктивности углеводородного коллектора является базой для развития новых дешевых экологичных технологий оценки продуктивности. Проведя регистрацию сейсмического фона вблизи нескольких скважин и используя информацию о суммарной толщине продуктивных интервалов в этих скважинах, получаем для выбранного месторождения параметры регрессионной прямой $TI = a + b \cdot NPZ$. Далее, проводя площадную регистрацию сейсмического поля по некоторой сетке опроса, строим карты распределения продуктивности согласно зависимости $NPZ(TI)$. Это позволяет точно оконтурить залежь и выбрать наиболее перспективные точки для бурения скважин по положению экстремальных значений термодинамического индикатора. По мере разработки месторождения и истощения запасов можно оперативно строить новые карты продуктивности и выявлять пропущенные запасы. На территории, где скважины еще не пробурены, перспективные зоны можно выделять по экстремумам в поле значений термодинамического индикатора, рассчитанного по площади изучаемого месторождения.

ВЫВОДЫ

Термодинамический индикатор — полезный инструмент для фундаментальных и прикладных исследований, для контроля изменений состояния горных пород во времени и пространстве. Он позволяет эффективно анализировать информацию о локальной продуктивности коллектора, содержащуюся в естественном сейсмическом фоне. Линейную регрессионную зависимость $TI(NPZ)$ можно использовать для оперативной оценки продуктивности коллектора по сейсмическому фону, измеренному на поверхности Земли, построения карт эффективных нефтенасыщенных толщин пласта, оценки границ распространения коллектора и выбора наиболее перспективных точек для бурения скважин.

Интересное направление будущих исследований — изучение состояния горных пород вблизи геотермальных резервуаров и в районе месторождений полезных ископаемых разного типа. В таких местах можно ожидать большую степень локальной неравновесности и неустойчивости состояния геологической среды. Однако механизмы эндогенной эмиссии могут быть различны, что проявится в преобладающих частотах, различных тенденциях отклонения степени упорядоченности от нормы локальной упорядоченности и других параметрах эффектов.

Автор выражает глубокую признательность Эрнст-Дитриху (Паулю) Роде, председателю и техническому директору Marmot PM Technologies SA, Швейцария (Ernst D. (Paul) Rode, Chairman & CTO of Marmot PM Technologies SA, Switzerland) за предоставление высококачественных полевых данных и геофизической информации, благодаря которым появилась возможность проведения данных исследований, а также благодарит академика РАН А. Н. Дмитриевского и Э.-Д. Роде за полезные обсуждения результатов, замечания и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Зецер Ю. И. Перераспределение энергии во внутренних и внешних геосферах при высокоэнергетических воздействиях // Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. — М.: ИДГ РАН, 1994. — С. 10–18.
2. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. — М.: Науч. мир, 2009. — 520 с.
3. Хаврошкин О. Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. — М.: ОИФЗ РАН, 1999. — 285 с.
4. Дьяконов Б. П., Троянов А. К., Кусонский О. А., Назаров А. Н., Фадеев В. А. Геологическая информативность скважных исследований высокочастотных сейсмоакустических шумов // Вулканология и сейсмология. — 1991. — № 1. — С. 112–116.
5. Каррыев Б. С., Курбанов М. К., Николаев А. В., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. Динамический режим сейсмической эмиссии: хаос и самоорганизация // ДАН СССР. — 1986. — Т. 290. — № 1. — С. 67–71.
6. А. с. SU 1000962 A1. Способ сейсмической разведки / А. В. Николаев, П. А. Троицкий, И. Я. Чеботарева. Заявка № 3213796 от 08.12.1980 г. // Опубл. в БИ. — 1983. — № 8.
7. Чеботарева И. Я. Эмиссионная сейсмическая томография — инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры // Георесурсы. — 2018. — Т. 20. — № 3. — Ч. 2. — С. 238–245.
8. Чеботарева И. Я., Дмитриевский А. Н. Диссипативная сейсмика // Физ. мезомеханика. — 2020. — Т. 23. — № 1. — С. 14–32.
9. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
10. Мухамедиев Ш. А. О дискретном строении геосреды и континуальном подходе к моделированию ее движения // Геодинамика и тектонофизика. — 2016. — Т. 7. — № 3. — С. 347–381.
11. Проблемы нелинейной сейсмики / отв. ред. А. В. Николаев. — М.: Наука, 1987. — 287 с.
12. Зайцев В. Ю. О “неклассических” проявлениях микроструктурно обусловленной акустической нелинейности на примере контактодержащих сред // Нелинейные волны. — Н. Новгород: ИПФ РАН, 2007. — С. 170–190.
13. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 258 с.
14. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2. — С. 3–27.
15. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 10–38.
16. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. — М.: ОИФЗ РАН, 1996. — 188 с.
17. Летников Ф. А. Синергетика геологических систем. — Новосибирск: Наука, 1992. — 230 с.
18. Chebotareva I. Ya. and Volodin I. A. Criterion of the order degree for self-oscillating regimes in the analysis of geophysical medium dynamics, Doklady Earth Sciences, 2010, Vol. 432, No. 1. — P. 618–621.
19. Chebotareva I. Ya. and Volodin I. A. A method for localizing seismic sources whose signals are separated by an order of difference from the background noise, Doklady Earth Sciences, 2011, Vol. 437, No. 1. — P. 428–431.

20. **Соболев Г. А.** Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования — ЛНТ // Физика Земли. — 2019. — № 1. — С. 166–179.
21. **Павлинова Н. В., Шахова А. Ю.** Роль грязевого вулканизма при формировании нефтегазовых залежей Южно-Пильтунского участка Пильтун-Астохского месторождения на шельфе острова Сахалин // Вестн. РУДН. Сер. Инж. исследования. — 2016. — № 2. — С. 74–81.
22. **Гулиев И. С., Юсубов Н. П., Гусейнова Ш. М.** О механизме образования грязевых вулканов в южно-каспийской впадине по данным 2D- и 3D-сейсморазведки // Физика Земли. — 2020. — № 5. — С. 131–138.
23. **Климонтович Ю. Л.** Статистическая теория открытых систем. Т. 1. — М.: Янус, 1995. — 624 с.
24. **Chebotareva I. Y., Rode E. D., and Dmitrievskiy A. N.** A thermodynamic indicator for remote assessment of the productivity of a hydrocarbon reservoir, Doklady Earth Sciences, 2021, Vol. 500, No. 2. — P. 857–860.
25. **Marple S.** Digital spectral analysis with applications, Englewood Cliffs N. J., Prentice-Hall, 1987. — 492 p.
26. **Aki K. and Richards P. G.** Quantitative seismology, Sausalito, California, University Science Books, 2002. — 700 p.

Поступила в редакцию 04/IV 2022

После доработки 26/IV 2022

Принята к публикации 06/V 2022