

ПЕРСПЕКТИВЫ ГРАВИМЕТРИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИ НЕСТАБИЛЬНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*К динамически нестабильным геологическим объектам относятся залежи углеводородов, подземные хранилища газов, зоны тектонических нарушений. Такие объекты генерируют переменные гравитационно-инерциальные аномалии, являющиеся помехами при проведении высокоточных гравиметрических съемок, но одновременно содержат информацию о динамических свойствах геологических объектов. Предложены методические способы их ослабления. Предлагается прибор для записи таких вариаций, которые можно использовать для обнаружения, локализации и исследования динамически активных природных объектов. **Ключевые слова:** эндогенные микросейсмические волны, мониторинг разработки газоконденсатных месторождений, гравитационно-инерциальные аномалии.*

Lobanov A.M., Romanov V.V. (MGRI-RGGRU)

PROSPECTS OF GRAVIMETRY IN THE STUDY OF DYNAMICALLY UNSTABLE GEOLOGICAL OBJECTS

*Hydrocarbon deposits, underground storage of gases, zones of tectonic disturbances belong to dynamically unstable natural object. Such objects are capable of generating variables gravitational-inertial anomalies, which are the obstacles when carrying out high-precision gravimetric survey. The author proposes methodological ways to reduce their impact. The author proposes a device for the registration of such variations, which can be used for detection, localization and study dynamically active geological objects. **Key words:** endogenous microseismic waves, monitoring of the development of gas condensates fields, graviinertial anomalies.*

При проведении гравиметрических съемок объекты исследования обычно рассматриваются как статические, не изменяющие своих физических свойств и положения в процессе съемки. В этом случае обнаруженные аномалии связывают исключительно с возмущающими массами геологических объектов. К помехам относят аномалии от объектов, не представляющих интерес при проведении данной съемки и являющихся статическими, и погрешности измерений, рассматриваемые как эргодические, распределенные по нормальному закону случайных функций. Но при проведении гравиметрических работ на геологических объектах с микрогальной погрешностью выясняется, что предположение о статичности аномалий и помех не всегда верно. Планета Земля в целом представляет собой динамически нестабильный астрономический объект, генерирующий широкий спектр инерциальных и гравитационных колебаний (рис. 1) [9].

Характерно, что нет резкой границы по частоте и интенсивности перехода инерциальных помех к вариациям гравитационного поля. Источниками вариаций силы тяжести могут быть приливные изменения силы тяжести, изменения атмосферного давления и облачности в процессе съемки, массы разрабатываемого геологиче-

ского объекта или его окружения и др. Источниками низкочастотных инерциальных колебаний земной поверхности могут быть собственные колебания Земли с периодами 3–30 мин. [2], отдаленные землетрясения, наклоны земной поверхности [10], напряженно-упругое состояние участков земной коры и другие причины. На рис. 2 показан график деформации земной поверхности от удаленного землетрясения. Сжатие и растяжение земной коры, учитывая ее мощность в 40–45 км, может вызывать временные изменения массы земной коры в точке измерения и приводить к изменениям силы тяжести на уровне 2–5 мкГал с периодами 3–7 мин.

Залежи углеводородов (УВ), особенно при разработке, также генерируют собственные эндогенные микросейсмические волны (ЭМСВ) различной частоты и интенсивности в зависимости от пористости пород, давления внутри продуктивного пласта, режима эксплуатации, лунно-солнечных вариаций силы тяжести и других факторов [3, 5, 8, 12]. Физической основой ЭМСВ могут быть также явления в нефтегазовых коллекторах, известные как «прыжки Хейнса» и эффект Жамена [4], заключающиеся в ступенчатом изменении давления в порах пород коллекторов. К таким же объектам относятся подземные хранилища газа (ПХГ), тектонические структуры, крупные инженерные объекты (например, тоннели-путепроводы [11] и др.). Эти объекты могут генерировать инерциальные помехи различной частоты и интенсивности, которые необходимо учитывать при их изучении и мониторинге. Такие объекты уже нельзя рассматривать как статические, их следует рассматривать как динамические, и они требуют специального подхода при изучении. Динамические характеристики таких объектов зависят от микросмещений отдельных их частей относительно вмещающих пород, перемещения и вибраций флюидов в коллекторах пород на фоне лунно-солнечных сжатий и растяжений земной поверхности, изменения пластовых давлений при разработке залежей УВ или при эксплуатации ПХГ и других факторов (рис. 3). Гравитационное поле с амплитудами вариаций от 5 мкГал и ниже следует рассматривать как информационное поле в динамическом состоянии природных и инженерно-природных объектов.

Актуальной проблемой в нефтегазовой отрасли в настоящее время является разработка методов контроля

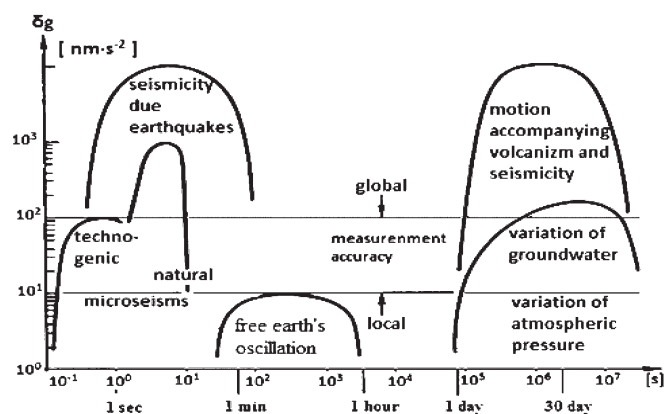


Рис. 1. Спектр гравитационно-инерциальных колебаний Земли [9]

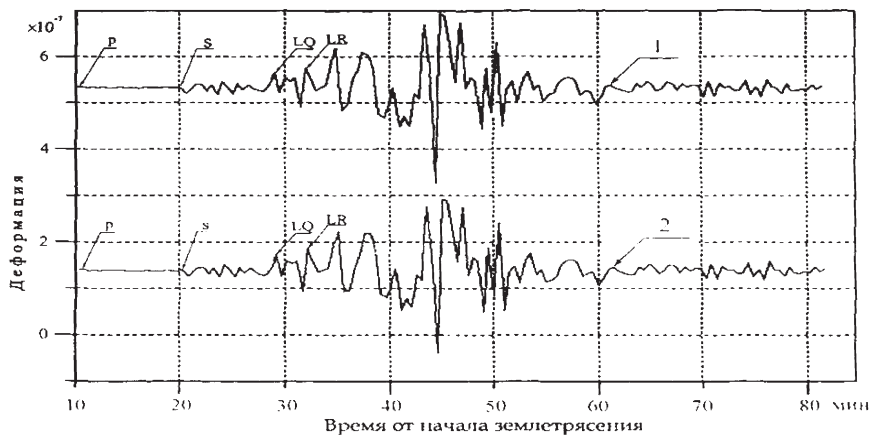


Рис. 2. Запись землетрясения, зарегистрированного на станции Протвино двумя параллельно установленными деформографами [10]

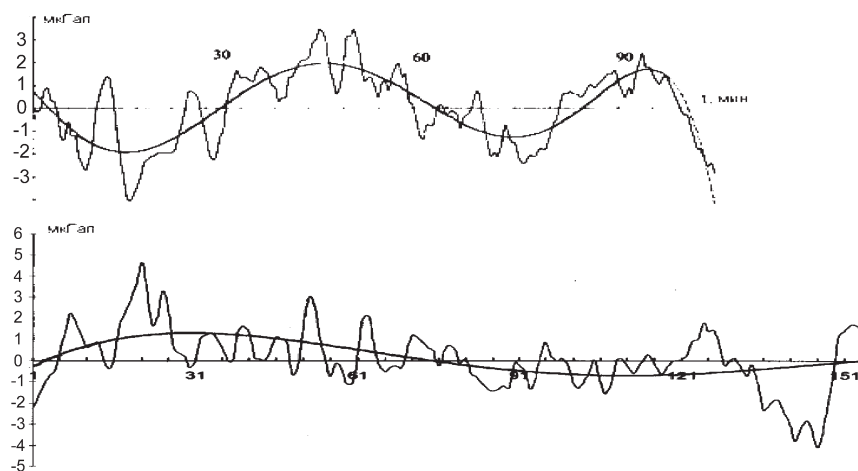


Рис. 3. Характер инфранизкочастотных колебаний, записанных авторами с помощью гравиметра ГДК (д. Александровка Калужской обл., 2000 г.)

эксплуатации залежей УВ экологически чистыми, недорогими и быстрыми технологиями. Мониторинг разработки нефтяных и газоконденсатных месторождений (ГКМ) методами гравиметрии является перспективным направлением. Задачей такого мониторинга является: контроль за изменением контура залежи УВ в процессе его отбора; оценка остаточных запасов залежи; локализация наиболее продуктивных участков с целью обоснования закладки добывающих и контролируемых скважин, а также локализация зон распространения эффектов гидроразрыва пласта (ГРП). Наиболее обстоятельно практические вопросы гравиметрического мониторинга разработки газоконденсатных залежей впервые в России изложены в работе О.П. Андреева и др. [1]. Необходимо отметить, что мониторинг разработки природных залежей УВ намного сложнее и неопределенней, чем аналогичный мониторинг подземных хранилищ газа (ПХГ). При мониторинге объектов ПХГ не происходит утечки или подпитки коллекторов пород газом извне. Функционирование ПХГ можно рассматривать как динамически стационарное, а разрабатываемые залежи УВ — как динамически неопределенные. В работе [1] подробно изложены методические и нормативные рекомендации. Только с появлением высокоточных гравиметров (Scintrex CG-5autograv)

стало возможным применение гравиметрического контроля разработки ГКМ. В настоящее время такие работы находятся на стадии экспериментальных и требуют неординарного подхода как к методике и постановке измерений, так и к анализу получаемых результатов. Мониторинг ГКМ относится к методам полевой гравиметрии, основные методические требования к которым заключаются в том, чтобы проводить измерения силы тяжести монотонными и небольшой продолжительности рейсами, однообразным подходом взятия измерений на пунктах в условиях минимального влияния внешних атмосферных и техногенных помех, а также с учетом производительности и независимого контроля. При измерении аномалий силы тяжести, соизмеримых по амплитуде с помехами, недостаточно только высокая точность измерений, необходима и высокая плотность сети наблюдений, а при соизмеримых частотах аномалий и помех — методики рандомизации или одновременной регистрации переменных гравиметрических помех [6, 7].

Физической основой гравиметрического мониторинга ГКМ и ПХГ общепринято считать изменение массы газосодержащего коллектора пласта после отбора газа и замещение его более плотным флюидом, что должно привести к увеличению силы тяжести в этой

части залежи. Нефтегазосодержащий пласт можно аппроксимировать моделью в виде горизонтального плоского слоя, аномальный эффект которого вычисляется по известной формуле:

$$G = 0,0419\sigma h \text{ (мГал)},$$

где: σ — эффективная плотность пласта, определяемая как разность между плотностью пласта, заполненного газом или нефтью в естественном залегании и плотностью того же пласта после заполнения его пор пластовой водой (флюидом), г/см³; h — мощность пласта, м.

Если принять плотность флюида $\sigma_{\text{ф}}$, равной 1,03 г/см³, плотность газа $\sigma_{\text{г}}$ — 0,3 г/см³, коэффициент пористости пласта $k_{\text{п}}$ = 0,25 и коэффициент вытеснения газа водой $k_{\text{зам}}$ = 0,8, получим эффективную плотность σ порядка 0,15 г/см³. Подставляя эти данные в формулу, получим гравитационный эффект увеличения силы тяжести порядка 6 мкГал/м замещения пласта водой. Для нефтяных залежей, характеризующихся меньшей эффективной плотностью, ожидаемый гравитационный эффект будет еще меньше (при $\sigma_{\text{ф}}$ = 1,03; $\sigma_{\text{н}}$ = 0,8; $k_{\text{п}}$ = 0,25; $k_{\text{зам}}$ = 0,3) — менее 1 мкГал/м мощности пласта. Если для контроля разработки газоконденсатных залежей гравиметрический эффект достаточен, то для контроля разработки нефтяных залежей эффектив-

ность гравитационного метода явно недостаточна, за исключением очень пористых коллекторов и при большой мощности замещения нефти водой. Такая модель может быть принята для замкнутой структуры месторождения в том случае, если вода замещает УВ только с латеральных сторон. При поступлении воды снизу по всему коллектору должна рассматриваться другая модель, если же происходит подпитка залежи нефтью или газом из глубинных пластов, тогда — третья модель. Моделей может быть много, что усложняет процесс интерпретации результатов измерений силы тяжести. И, вероятно, все типы моделей проявляются на месторождении, но в разных его частях и в различной степени. **Определить характер поведения УВ в структуре только по одним измерениям силы тяжести практически невозможно.** Это наглядно показано в работе [1, рис. 6.1–6.4]. Накопленные изменения силы тяжести варьируют в интервале 40 мкГал при точности измерений 5 мкГал (с учетом поправок за изменение атмосферного давления, изменение мощности снегового покрова и влажности грунта на долговременных гравиметрических пунктах) (рис. 4).

Очевидно, что на результаты измерений силы тяжести влияют посторонние переменные факторы, которые не были учтены при проведении измерений и их интерпретации. Поэтому успешное выполнение задач мониторинга разработки УВ гравиметрическим методом, применяя традиционный подход к измерениям

силы тяжести, весьма затруднителен. Природа сама подсказывает, что следует усовершенствовать традиционный подход при изучении динамически нестабильных объектов. Основные методические приемы при измерении только гравитационной составляющей изложены в работе [6]. Они заключаются в том, что одновременно с измерениями на полевых пунктах следует проводить непрерывную запись гравиинерциальных колебаний на исходном пункте, расположенном вне залежи, по которой при обработке результатов записей на рядовых пунктах следует вводить соответствующие поправки (аналогично тому, как это производится в магниторазведке). Исключение переменной составляющей измеряемого гравитационного поля возможно также одновременным измерением двумя приборами на двух последовательных пунктах (аналог градиент-метода в электроразведке естественного поля) при корреляции переменной составляющей с измеряемой аномалией — только способы рандомизации помех или аномалий [7] могут их разделить.

Известно, что многие месторождения углеводородов, и особенно их высокодебитные участки приурочены к зонам трещиноватости и системам тектонических нарушений [11]. На фоне приливных и собственных колебаний поверхности Земли под влиянием техногенных нагрузок, связанных с разработкой залежей УВ (отбор УВ, закачка воды или попутного газа с целью поддержания пластового давления), месторождения, и особенно их тектонически нестабильные участки, генерируют широкий спектр инерциальных колебаний. Периодические сжатия и растяжения таких зон вызывают нестабильность собственно гравитационного поля, оцениваемого на уровне нескольких микроГал, которые накладываются и коррелируются с низкочастотными инерциальными колебаниями. Таким образом, дневная поверхность месторождений характеризуется переменным гравиинерциальным полем с преобладанием низкочастотных составляющих, учитывая, что высокочастотные составляющие быстро ослабевают с расстоянием от источника до поверхности. **Поэтому перспективным направлением при изучении строения месторождений УВ и выделении высокодебитных участков является использование гравиинерциального поля.** Это новое направление в нефтегазовой геофизике и оно, безусловно, требует проведения опытных работ с целью обоснования методики наблюдений, обработки и интерпретации результатов.

С целью изучения динамики колебаний поверхности месторождений УВ в диапазоне частот 0,001 — 0,5 гц можно использовать гравиметры с чувствительными системами в виде горизонтального маятника, но работающих в режиме сейсмографов (ГНУ-КВ, La Cost & Romberg, Sodin, Worden). Эти марки приборов менее чувствительны к микросейсмическим высокочастотным природным и техногенным помехам. Автоматизированный гравиметр Scintrex CG-5 autograv, чувствительная система которого

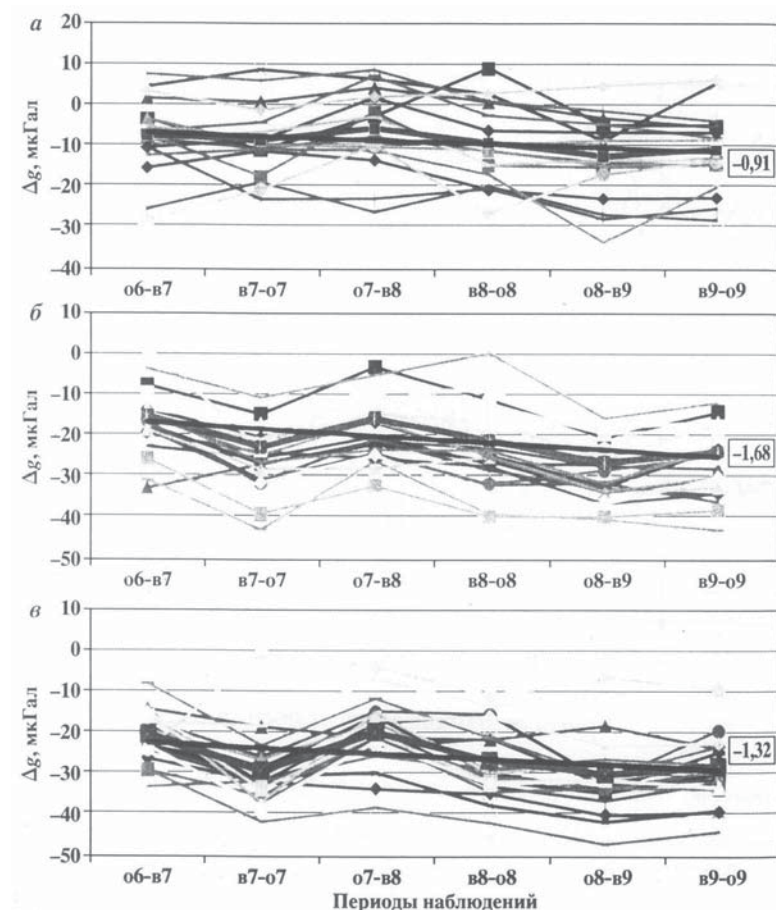


Рис. 4. Накопленные значения изменения силы тяжести на трех различных кустах (а, б, в) добычных скважин за 2,5 года на ГКМ Заполярное [1]

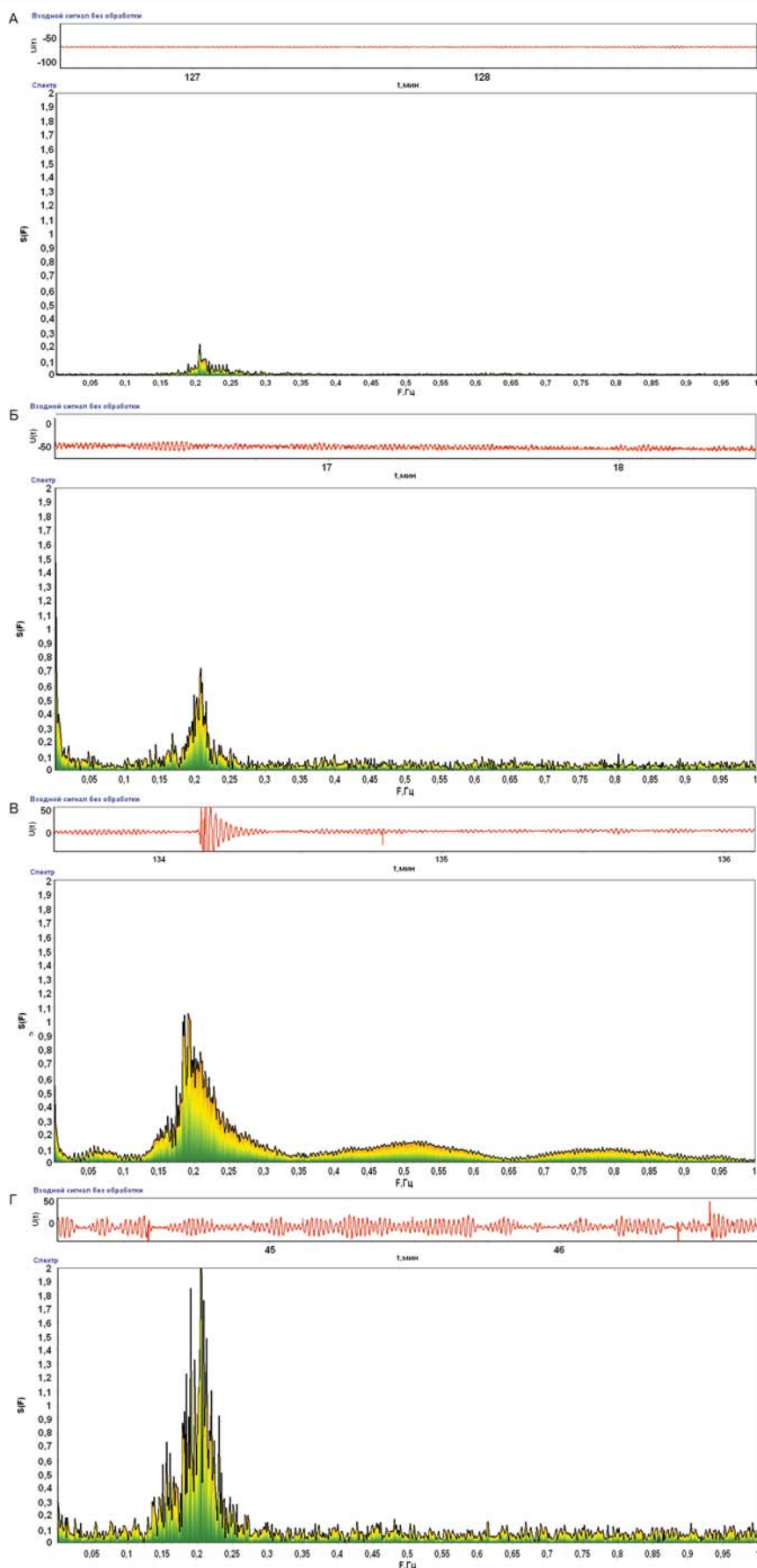


Рис. 5. Спектры колебаний маятника гравиметра ГНУ-КВ в 12 минутном окне: А — д. Александровка (г. Южнов); Б — сейсмологическая станция в г. Обнинск; В — здание МГРИ-РГГРУ; Г — ст. метро «Спартак» ночью

выполнена в виде вертикальной пружины, менее подходит для этих целей, т.к. она очень чувствительна к микросейсмическим высокочастотным помехам атмосферного и техногенного происхождения, к тому же автоматическая компенсация приводит к рандомизации входного сигнала, по которому невозможно определить реальный спектр помех.

В Российском государственном геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) имеется опыт регистрации ЭМСВ с помощью гравиметра ГНУ-КВ, работающего в режиме сейсмографа. Устройство состоит из гравиметра, электронного окуляра, позволяющего передавать на экран компьютера изображения колебаний маятника и программы, позволяющей оцифровывать отклонения маятника относительно горизонтального положения в условных единицах. Устройство представляет собой гравинерционную станцию с цифровой регистрацией входного сигнала в спектре низких частот (рис. 5). Мощность спектра микросейсмического поля различна в разных геологических и производственных условиях, что может быть использовано для исследования природных и производственных объектов. Актуальным является опробование эффективности этого устройства на реальных месторождениях УВ.

Программа исследований ЭМСВ в простейшем варианте на месторождении УВ предполагает проведение синхронных регистраций гравинерционных вариаций (ЭМСВ) по 10–15 мин. на каждой точке профиля, секущего месторождение с одновременной непрерывной регистрацией ЭМСВ на базовом пункте, расположенном вне контура месторождения. Сравнивая дисперсии или спектры гравинерционных колебаний на базовом пункте и на пунктах, расположенных на площади месторождения, можно будет выделить аномальные значения этих параметров, связанные с активностью тектонических зон и узлов. В идеальном случае можно составить карту дисперсий или спектров ЭМСВ, которая будет являться основанием для определения мест заложения эксплуатационных и разведочных скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К. и др. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Состояние, проблемы, перспективы. — М.: Недра, 2012. — 374 с.

2. Буллен К.Е. Плотность Земли. — М.: Мир, 1978. — С. 326–327.
3. Ведерников Г.В., Чернышова Т.И. Экспертиза рекомендаций на заложение поисково-разведочных скважин // Геофизика. — 2010. — № 1. — С. 38–44.
4. Ковалева Л.А. Физика нефтегазового пласта. — Уфа: РИО, БашГУ, 2008. — С. 192–193.
5. Лобанов А.М., Каххоров У.Х. Опыт регистрации инфранизкочастотных гравинерциальных колебаний: Материалы «Полар-2012». — М.: ИЗМИРАН, 2012.
6. Лобанов А.М., Волоцков М.Ю., Скачков С.А. О проблемах микрорегальных съемок // Разведка и охрана недр. — 2012. — № 6. — С. 50–52.
7. Лобанов А.М. Рандомизация, как способ уменьшения корреляционных связей помех и аномалий // Геофизика. — 2012. — № 1. — С. 66–69.
8. Николаевский В.Н. Изменения сейсмических волн из-за присутствия газа в пластах // Геофизика. — 2014. — № 3. — С. 14–20.
9. Торгее В. Гравиметрия. — М.: МИР, 1999. — С. 75–76.
10. Латынина А.А., Миллюков В.К., Васильев И.М. О глобальных возмущениях деформаций земной коры перед сильнейшими мировыми землетрясениями / Геофизика XXI столетия. — М.: Научный мир, 2006. — С. 206–212.
11. Пичугин О.Н., Александров Д.М., Горюнов Е.Ю. и др. Влияние современной геодинамической обстановки на технологические показатели работы скважин месторождения Северные Бузачи // Вестник ЦКР Роснедра. — 2014. — № 2. — С. 28 — 36.
12. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А. и др. Новые технологии и решение прикладных задач. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. Т. 3. — М.: ЦИТвП, 2007. — С. 149 — 266.

© Лобанов А.М., Романов В.В., 2015

Лобанов Александр Михайлович // lobannet@mail.ru
Романов Виктор Валерьевич // roman_off@mail.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 504

$$\Delta P_p \leq \Delta P_{\text{доп}}$$

Аликин Э.А. (Пермский государственный национальный исследовательский университет)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ГЛУБОКИХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ В НИХ ВРЕДНЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ

*Изложены методы оценки эксплуатационной емкости: гидродинамический, гидравлический, балансовый и гидрогеологических аналогов. **Ключевые слова:** полигон, пласт-коллектор, допустимое и расчетное повышения пластового давления.*

Alikin E.A. (Perm state national research University)

METHOD OF ASSESSMENT OF OPERATIONAL CAPACITY DEEP AQUIFERS FOR DISPOSAL OF HARMFUL LIQUID WASTE

*The article describes the methods for evaluating the operational capacity: hydrodynamic, hydraulic, balance, and hydrogeological analogs. **Key words:** polygon, reservoir and estimated allowable increase reservoir pressure.*

В нормативно-методических документах [2, 4] отсутствует дефиниция предела повышения пластового давления в пласте-коллекторе при принудительном внедрении в него жидких отходов. Это предопределяет недостаточную достоверность оценки эксплуатационной емкости пласта-коллектора, независимо от использованного метода.

Опираясь на основные дефиниции, приведенные в статье [1], а также аналогию методики оценки эксплуатационных запасов подземных вод и эксплуатационной емкости пласта-коллектора предлагается внести понятие допустимого повышения пластового давления ($\Delta P_{\text{доп}}$) по аналогии с допустимым понижением уровня подземных вод при эксплуатации водозабора. В этом случае расчетное повышение пластового давления (ΔP_p) на конечный срок эксплуатации полигона не должно превышать $\Delta P_{\text{доп}}$ во избежание гидроразрыва верхнего водоупора и нарушения изолированности пласта-коллектора:

При соблюдении неравенства расчет эксплуатационной емкости является приемлемым, в противном случае необходим перерасчет, основанный на пересмотре основных технико-экономических концепций эксплуатации полигона (количества нагнетательных скважин, их проектной приемистости и взаимного расположения).

Из геомеханики известно, что $\Delta P_{\text{доп}}$ равно разности между боковым давлением (P_b) и пластовым давлением в естественных условиях верхнего водоупора.

Боковое давление определяется по формулам:

$$P_b = \frac{V}{1-V} \cdot P_{\text{гор}}$$

где V — коэффициент Пуассона, $P_{\text{гор}}$ — давление выше-лежащих пород.

$$V = 0,35 - 0,006 \cdot n,$$

где n — пористость пород водоупора, %.

Давление $P_{\text{гор}}$ определяется по формуле:

$$P_{\text{гор}} = H \cdot \gamma,$$

где γ — усредненная объемная масса вышележащих пород, т/м³.

Пластовое давление ($P_{\text{пл}}$) в пласте-коллекторе определяется по формуле:

$$P_{\text{пл}} = 0,106(H - 0,489),$$

где H — глубина залегания подошвы верхнего водоупора.

Тогда
$$\Delta P_{\text{доп}} = P_b - P_{\text{пл}}$$

В реальных условиях глубоких водоносных горизонтов $\Delta P_{\text{доп}}$ изменяется от 1,5 до 5,5 МПа.

Расчетные повышения давления ΔP_p в пласте-коллекторе в зависимости от конкретных геологических гидрогеологических, структурных и палеогеографических условий, а также объема отходов и изученности целевого пласта-коллектора определяются следующими методами: гидродинамическим, в том числе методом математического моделирования; гидравлическим; балансовым и методом гидрогеологических аналогов.