

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Ю.О. Кузьмин
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Как показано в работах [6, 8, 9], геодинамическая опасность объекта – это факт подверженности определенной территории воздействию опасного явления природы – современной аномальной геодинамике недр, – которое при определенных обстоятельствах может привести к тяжелым последствиям для человека и среды его обитания. При этом под современной аномальной геодинамикой недр понимаются современные (протекающие в настоящее время) высокоинтенсивные деформационные и сейсмические процессы, которые имеют природный и/или техногенный генезис и реализуются в наиболее экстремальной форме в зонах разломов.

В последние годы появились работы [1, 6, 7, 13, 14], в которых рассматриваются различные аспекты обеспечения геодинамической безопасности объектов нефтегазового комплекса (НГК) – месторождений УВ с развитой инфраструктурой, магистральных нефтегазопроводов, объектов переработки и хранения углеводородного сырья. В этих исследованиях, носящих мультидисциплинарный характер, активно участвуют геологи, геофизики, геомеханики, геодезисты, маркшейдеры, т.е. практически все специалисты в области наук о Земле.

Однако следует признать, что в настоящее время при определении критериев геодинамической опасности нефтегазовых объектов нередко применяются весьма противоречивые подходы. Особенно остро эта проблема обозначилась при идентификации геодинамической опасности по фактору аномальных деформационных процессов: обширных просадок земной поверхности территорий месторождений и современной активизации разломных зон. Так, например, специалисты геолого-геофизического профиля используют в основном вербальное описание тектонических процессов; геомеханики, опираясь на результаты строгих количественных расчетов, зачастую игнорируют тектонический фактор, анализируя лишь техногенные процессы; а маркшейдеры и геодезисты опираются исключительно на результаты инструментальных наблюдений.

Это приводит к тому, что при оценке негативных деформационных последствий длительной разработки месторождений УВ делаются выводы о возможности

формирования многометровых просадок земной поверхности. Или, например, при строительстве магистральных трубопроводов всем выявленным на стадии изысканий нарушениям: разломам, разрывам, линеаментам и зонам повышенной трещиноватости – присваивается одинаковый (как правило, высокий!) ранг опасности без каких-либо количественных оценок негативного воздействия на трубу.

Особый интерес представляет ситуация, когда при оценке геодинамической опасности используются результаты повторных геодезических и/или геофизических наблюдений. Очень часто исследователи, получая высокоточные количественные характеристики деформационного процесса, делают качественные выводы («больше – меньше») об уровне геодинамической опасности.

В этой связи представляется крайне важной проблема разработки методов комплексной количественной идентификации геодинамической опасности нефтегазовых объектов, которая единым образом учитывала бы объективные особенности геодинамических факторов и вариабельность специфики объектов.

В данной работе предлагаются обоснование и формулировка количественных критериев идентификации геодинамической опасности, которые базируются на принципах комплексного сочетания методов тектонофизики и современной геодинамики [11].

В основе этого сочетания лежит гармоническое использование методов физики деформируемых сред для описания количественных закономерностей протекания тектонических процессов и результатов прецизионных геодезических измерений, оценивающих пространственно-временные характеристики современной динамики геологической среды.

Базисным условием количественной идентификации геодинамической опасности объектов НГК является детальный количественный анализ уровня аномального деформационного воздействия на объект и сравнение его с нормативными (пороговыми) значениями их деформационной устойчивости. Только в этом случае можно ставить вопрос об объективных критериях оценки геодинамической опасности и, соответственно, о времени безопасного функционирования (долговечности) объектов.

В этой связи рассмотрим подробно закономерности формирования современной аномальной геодинамики недр для двух основных факторов геодинамической опасности объектов НГК – обширных просадок земной поверхности на разрабатываемых месторождениях УВ и деформационной активизации разломных зон.

Механизм формирования обширных просадок земной поверхности территории разрабатываемых месторождений УВ

Расчет обширных просадок земной поверхности при крайне резкой изменчивости физико-механических свойств пород, слагающих массив горных пород и пласты-коллекторы месторождений нефти и газа, требует применения весьма сложных математических моделей и компьютерных программ, основанных, как правило, на методе конечных и/или граничных элементов [5, 12, 15]. Однако эффективность использования этих методов крайне невелика, поскольку они не всегда обеспечивают адекватность полученных результатов натурным наблюдениям. Этому во многом способствует объективная ограниченность и погрешность в определении исходных данных. Расчеты основаны на ограниченном массиве экспериментальных данных о механических параметрах моделируемой среды: величине модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициентов сжимаемости пород и порового объема. Как известно, эти величины существенно изменяются в пределах даже ограниченного объема горных пород.

Поэтому до начала разработки месторождений наиболее перспективной является оценка диапазона минимальных и максимально возможных значений обширных просадок на основе феноменологических (тектонофизических) моделей, базирующихся на таких характеристиках геологической среды, точность определения которых адекватна точности проводимых оценок.

Как правило, в оценках принято, что деформации земной поверхности обусловлены объемной деформацией порового пространства коллектора. Кроме того, обычно принимается, что просадка земной поверхности эквивалентна изменению толщины пласта в процессе деформации. Подобное допущение, естественно, приводит к завышению величины просадок, поскольку при этом не учитывается эффект затухания деформации с глубиной, которое происходит в интервале глубин «кровля коллектора – земная поверхность».

Аналитические оценки формирования возможных обширных просадок территории месторождений можно проводить в рамках реализации трех подходов.

В первом подходе используется полуэмпирический метод Гиртсма [14], во втором реализуется модель деформируемого пласта-коллектора [6, 13], в третьем – результаты, полученные в рамках первых двух подходов, уточняются путем учета весомости среды и генезиса формирования залежи.

За рубежом расчеты просадок земной поверхности, как правило, проводят с применением метода Гиртсма. Этот метод основан на использовании большого массива экспериментальных данных для коэффициентов уплотнения пород, полученных путем анализа кернового материала, взятого с различных глубин залегания идентичных горных пород:

$$c_m = \frac{1}{z} \frac{dz}{dp}, \quad (1)$$

где z – расстояние до кровли пласта. При этом общее уменьшение толщины пласта определяется по формуле

$$\Delta h = \int_0^h \int_{p_{нач}}^{p_{кон}} c_m(p, z) dp dz, \quad (2)$$

где $p_{нач}$, $p_{кон}$ – пластовое давление в начале и в конце процесса разработки.

Использование аналитической модели деформируемого пласта [6, 13], в которой учитываются различные схемы приложенных нагрузок и геометрические размеры пласта, позволяет учесть затухание деформаций поверхности с глубиной залегания пласта. В качестве исходной феноменологической модели используется очевидное положение о том, что разработка месторождения УВ приводит к падению пластового давления, что, в свою очередь, в полном соответствии с законом Паскаля формирует изменение объемной деформации пласта-коллектора. В свою очередь, объемная деформация пласта-коллектора формируется за счет изменения порового объема.

Тогда оказываются справедливыми следующие, естественные в данном случае, соотношения:

$$e = \frac{\Delta V_{пор}}{V}, \quad (3)$$

$$\beta_{пор} = \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V_{пор}}{V_{пор}}, \quad (4)$$

$$m = V_{пор} / V, \quad (5)$$

где e – объемная деформация пласта-коллектора; $V_{пор}$ – объем порового пространства; $\Delta V_{пор}$ – изменение порового объема в процессе деформации; $\beta_{пор}$ – коэффициент сжимаемости порового пространства; V – объем породы в целом; m – пористость; ΔP – изменение порового давления.

Оперируя этими соотношениями, можно получить выражение для объемной деформации пласта-коллектора, которое связано с основными (базовыми) и наиболее распространенными характеристиками продуктивного пласта – Δp , m , $\beta_{\text{пор}}$:

$$e = \frac{\Delta V_{\text{пор}}}{V} = m\beta_{\text{пор}}\Delta p. \quad (6)$$

Для оценок максимальной величины просадок земной поверхности можно рассматривать случай плоской задачи [6, 13], когда предполагается, что всё изменение порового объема происходит за счет деформации породы в вертикальном направлении, т.е. $e_x = e_y = 0$.

Естественно, что этот случай, соответствующий максимальному значению, является для реальных пластовых условий, которые залегают в условиях бокового стеснения пород, весьма идеализированной моделью, но в то же время он представляет собой естественное ограничение сверху на самые смелые и сенсационные прогнозы многометровых оседаний земной поверхности, обусловленных разработкой месторождений УВ.

При этом необходимо отметить крайне важное и принципиальное обстоятельство. Наиболее распространенными физическими параметрами пласта, используемыми при расчетах деформаций земной поверхности разрабатываемых месторождений, являются: изменение пластового давления Δp ; пористость m , коэффициент сжимаемости порового пространства $\beta_{\text{пор}}$ и глубина залегания продуктивного пласта. Так, например, простейшая формула для оценки максимальных вертикальных смещений земной поверхности Δh выглядит следующим образом:

$$\Delta h = m\beta_{\text{пор}}\Delta p H. \quad (7)$$

В этой формуле значения H определяются полевыми данными; m и Δp находятся как по данным полевых измерений, так и методами промысловой геофизики; параметр $\beta_{\text{пор}}$ практически всегда определяется в процессе лабораторных экспериментов. Кроме того, значения этого параметра, в отличие от других, варьируют в очень больших пределах. При этом принципиально важной оказывается проблема редукции значений $\beta_{\text{пор}}$, полученных в лаборатории к пластовым условиям.

Проблема состоит в том, что давление на образец передается через поверхности прессового устройства, которые взаимодействуют с образцом по плоскости контакта

пресса с образцом. Иными словами, нагрузка σ_z со стороны пресса воздействует непосредственно на поровый объем, насыщенный жидкостью. В результате на торец образца действует давление σ_z , равное p , где p – поровое давление.

В реальных условиях деформированию подвергается система коллектор – покрывка, и поэтому в реальных условиях действующей нагрузкой, формирующей просадки поверхности, является tr , где p – пластовое давление. Впервые на этот факт обратил внимание В.А. Черных в работе [13] с позиций анализа условий равновесия сил, приложенных к произвольной горизонтальной площадке в массиве пород-коллекторов.

Однако представляется более важным перенесение этих представлений на весь процесс формирования обширных просадок и оценку влияния пластовых условий на значение коэффициента сжимаемости порового пространства, полученного в лабораторных экспериментах. На рис. 1 представлена схема формирования деформаций разрабатываемого пласта под действием изменений пластового давления. Его аналогом при лабораторных испытаниях является воздействие нагружающего устройства силой F_z на торец образца, помещенного в камеру высокого давления.

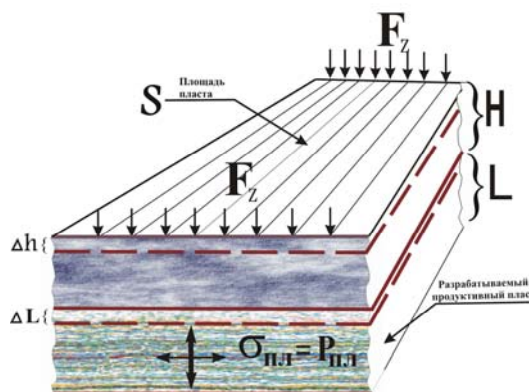


Рис. 1. Схема формирования обширных просадок земной поверхности

Для определения взаимосвязи физических параметров пласта предлагается использовать теорему взаимности работ Максвелла – Бетти, которая с успехом применяется в тех случаях, когда необходимо связывать внешнее напряженно-деформируемое состояние среды с внутренним. Согласно этой теореме работа внешних (внутренних) сил первого состояния на соответствующих им перемещениях второго состояния равна работе внешних (внутренних) сил второго состояния на соответствующих им перемещениях первого состояния.

В рассматриваемом случае силы и перемещения первого состояния – это сила пластового давления, приложенная к кровле разрабатываемого пласта, и вертикальное перемещение этой кровли ΔL соответственно. Сила и перемещение второго состояния – это F_z и Δh соответственно.

Поскольку и для первого, и для второго состояния деформируемый объем горных пород один и тот же, можно переписать эту теорему в терминах удельной потенциальной энергии. Тогда

$$P_{\text{пл}} \Delta \epsilon_{\text{пл}} = \sigma_z \Delta \epsilon_{\text{пор}}. \quad (8)$$

Но так как $\Delta \epsilon_{\text{пл}} = \Delta V_{\text{пор}} / V_{\text{пл}}$, а $\Delta \epsilon_{\text{пор}} = \Delta V_{\text{пор}} / V_{\text{пор}}$, то выражение

$$\sigma_z = P_{\text{пл}} m \quad (9)$$

использовалось при введении понятия о коэффициенте объемной сжимаемости пласта [2]

$\beta = \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V_{\text{пор}}}{V}$ для случаев, когда под воздействием изменения пластового давления в процессе деформирования охватывается весь пласт, а не только поровое пространство. В этом случае можно переписать формулу (7) применительно к задаче объемного деформирования системы (коллектор + крышка):

$$\Delta h = \beta \Delta p H. \quad (10)$$

Если в выражении (4), которое получено для лабораторных условий, учесть (9), то для β , которое соответствует пластовым условиям, необходимо использовать редукцию (поправку) по следующему очевидному соотношению:

$$\beta = \beta_{\text{пор(лаб)}} m^2. \quad (11)$$

В окончательном виде редуцированная к пластовым условиям формула для оценок максимальной просадки земной поверхности выглядит так:

$$\Delta h = m^2 \beta_{\text{пор(лаб)}} \Delta p H. \quad (12)$$

Теперь по этой формуле можно оценивать максимальные просадки земной поверхности, используя лабораторные данные по сжимаемости порового пространства.

Возвращаясь к проблеме оценки максимально возможных просадок земной поверхности, возникающей при разработке месторождений УВ, отметим, что условие редукции коэффициента сжимаемости порового пространства (11) приводит к существенному уменьшению амплитуд оседания. Действительно, так как пористость m на практике изменяется в диапазоне 10–30%, то согласно формуле (12) оценка ожидаемых смещений покажет снижение в 3–10 раз. Так, если принять типовое снижение пластового

давления за весь период разработки месторождения (например, газового) 10 МПа, сжимаемость, полученную в лабораторных условиях, – 10^{-3} 1/МПа, то при эффективной толщине газонасыщенности разрабатываемого пласта (горизонта) в 100 м, пористости в 10% получим по формуле (7) максимальную оценку вертикального смещения земной поверхности $\Delta h = 0,1$ м. Если провести редукцию коэффициента сжимаемости к пластовым условиям, то амплитуда просадки, рассчитываемая по формуле (13), снизится на порядок.

В работах [6, 7] рассмотрена адаптированная на примере Северо-Ставропольского газового месторождения [4] модель деформируемого пласта-коллектора, в котором были учтены эффекты деформирования вмещающей коллектор среды. При построении модели был использован формализм теории упругих включений. В работе [6] на основании теоремы взаимности работ Максвелла – Бетти для среды с дисторсией показано, что для изотропного включения, помещенного внутри упругого полупространства, смещения земной поверхности определяются как

$$U_r(\xi) = \varepsilon_{ij}^0(x) \cdot \iiint_V \sigma_{ij}^{(r)}(x, \xi) dV_\xi. \quad (14)$$

Здесь ε_{ij}^0 – дисторсия, или избыточная деформация, которая создает локальный источник деформационных аномалий в объёме среды V (во включении). Применительно к проблеме оценки техногенных деформаций ε_{ij}^0 есть та самая объемная деформация, которая создается изменением пластового давления.

Иными словами, справедливо следующее равенство:

$$\varepsilon_{ij}^0 = e = m^2 \beta_{\text{пор(лаб)}} \Delta P. \quad (15)$$

Подставляя в (14) значения функции Грина, можно показать, что, например, для вертикальных смещений

$$U_3 = e \iiint_V \frac{z dx dy dz}{R^3}, \quad \text{где } R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (16)$$

Чтобы получить аналитические выражения в работе [6], была использована гравидеформационная аналогия, которая основана на том, что выражение (16) формально подобно формуле для первой производной гравитационного потенциала (вертикального градиента потенциала) Δg .

Учитывая найденную аналогию, можно, используя известные в теории гравитационного потенциала выражения для геометрического сомножителя, получить аналитические выражения для смещений и деформаций свободной поверхности упругого полупространства, содержащего объемные включения различной конфигурации, в которых изменяются объемные деформации.

Описанный выше подход учитывает практически все основные параметры моделируемого процесса. Однако следует отметить, что эти формулы были получены в приближении невесомой среды. Учет эффекта веса толщи приводит к необходимости проведения численного моделирования, так как аналитические решения получить в усложнившихся условиях не представляется возможным.

В работе [6] сопоставление смещения земной поверхности для невесомой и весомой сред, полученное в рамках численного метода граничных элементов, показало, что амплитуды вертикальных смещений для просадок у весомой среды на 15–20% выше, чем у невесомой. Таким образом, полученные оценки по максимальному вертикальному смещению земной поверхности должны быть увеличены на 15–20%.

Однако, как показала статистика обширных просадок на различных месторождениях УВ, между максимальными просадками и глубиной залегания разрабатываемой залежи существует обратная взаимосвязь [1, 7]. Максимальные просадки получены для весьма неглубоких залежей (не глубже 2 км). Это парадоксальный результат, поскольку с глубиной влияние веса, а значит, и амплитуда просадок должны увеличиваться.

Детальный анализ позволяет объяснить этот парадокс следующим образом. Как известно, большинство нефтегазовых месторождений – это антиклинальные поднятия, которые, в зависимости от тектонических условий, сформировались в виде складок продольного и/или поперечного изгибов (рис. 2). Так как эти складки залегают на значительной глубине, то основные напряжения, сформировавшие эти складки в соответствующий геологический период времени, также приложены на этой глубине. Над продуктивными горизонтами с течением времени сформировался слой ламинарного строения, в меньшей степени нагруженный тектоническими усилиями, чем усилиями веса. С глубиной силы веса возрастают, но в области активного действия тектонических напряжений, которые в данном случае стремятся направить вышележащую толщу пород вверх, соотношение весовой и тектонической компонент напряжений выравнивается.

Кроме того, следует иметь в виду, что при формировании антиклинального поднятия продуктивные пласты становятся изогнутыми (рис. 2). При этом верхняя часть изогнутого слоя оказывается в обстановке субгоризонтального растяжения, а нижняя – в обстановке сжатия. Тогда продуктивные пласты, находящиеся в верхней части, будут стремиться укорачиваться в вертикальном направлении, а находящиеся в нижней части – будут удлиняться. Естественно, что продуктивные пласты, залегающие в верхней части (по отношению к нейтральной оси изгиба), будут способствовать увеличению просадки земной поверхности, обусловленной снижением пластового давления, а горизонты, залегающие в нижней части, будут уменьшать общее оседание.

Более того, при одновременной эксплуатации нескольких горизонтов, расположенных на различных глубинах (особенно ниже нейтральной оси), возможна ситуация, когда просадки либо вообще не возникнут, либо будет наблюдаться поднятие земной поверхности.

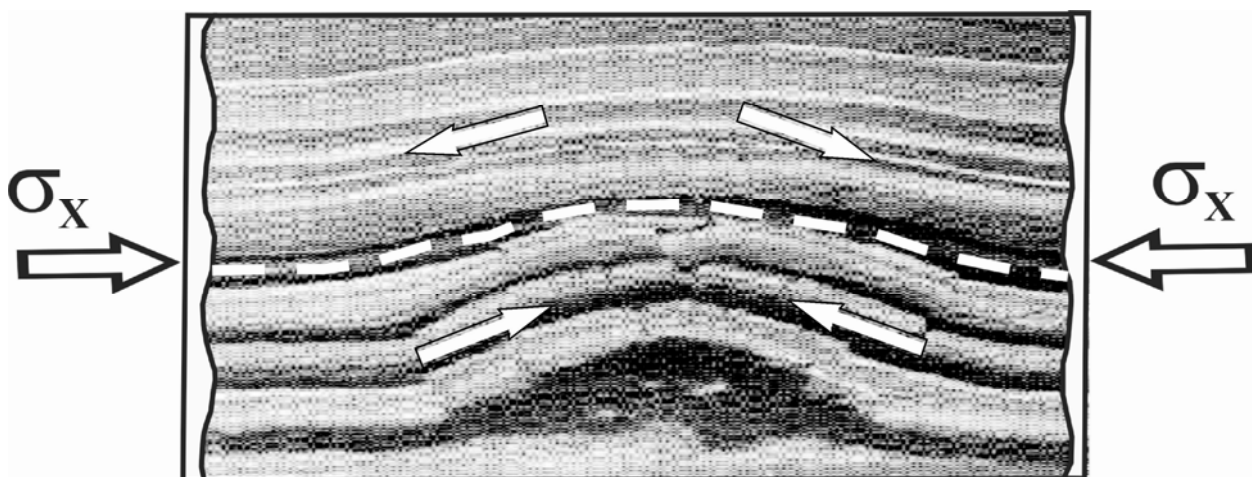


Рис. 2. Условная схема антиклинального поднятия

Исходя из имеющихся оценок уровня напряжений, можно показать, что в диапазоне глубин 1.5–2.0 км генетическая (тектоническая) составляющая напряжений становится соизмеримой с весовой и даже превосходит ее. В итоге подобная конкуренция между тектонической и весовой составляющими напряжений приводит к тому, что основной фактор формирования обширных просадок (сжатие коллектора) перестает быть определяющим. Именно поэтому, в отличие от месторождений твердых полезных

ископаемых, на месторождениях жидких УВ обширные просадки, превышающие 1 м, являются весьма редким явлением.

Резюмируя, можно констатировать, что только рассмотрение процесса формирования обширных просадок земной поверхности как техногенно индуцированного процесса, при котором объемные деформации пласта-коллектора происходят в обстановке внешних, генетически обуславливающих данную складку тектонических напряжений и веса вышележащей толщи пород, позволяет адекватно идентифицировать уровень аномальных деформаций и степень геодинамической опасности нефтегазовых объектов.

Оценка уровня современной аномальной деформационной активизации разломов

Современная аномальная деформационная активизация разломных зон двояким образом выступает в качестве фактора геодинамической опасности для объектов нефтегазового комплекса.

Во-первых, активные зоны разломов необходимо учитывать при строительстве магистральных нефтегазопроводов. Во-вторых, интенсивная эксплуатация месторождений УВ приводит к активизации разломных зон, расположенных в пределах месторождения.

К настоящему времени имеют место два явных противоречия в оценках геодинамической опасности объектов НГК, расположенных в зонах разломов. С одной стороны, анализ геодинамических последствий длительной разработки месторождений показал, что доминирующим фактором опасности являются обширные просадки. С другой стороны, при учете влияния зон активных тектонических разломов на магистральные трубопроводы полагается, что все выявленные тектонические нарушения являются опасными в равной степени.

Вместе с тем в ряде предыдущих работ [7–12] автором было показано, что имеют место современные активные (опасные) разломы, которые распространены повсеместно и поэтому являются доминирующим фактором геодинамической опасности для объектов НГК.

По результатам многочисленных и многократных геодезических наблюдений были выявлены современные суперинтенсивные деформации (СД) земной поверхности в зонах разломов с высокими среднегодовыми скоростями относительных деформаций $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-4}$ в год. Эти процессы способны за период эксплуатации объекта накопить

деформации, соизмеримые с критическими или опасными (по терминологии нормативных документов) [9, 10].

В этой связи представляется целесообразным рассматривать всю совокупность проявлений современной аномальной геодинамики разломов как результат параметрического индуцирования (возбуждения) деформационной активизации разломных зон под воздействием природно-техногенных факторов. В этом случае в качестве единой феноменологической схемы формирования аномальных деформаций земной поверхности выступает уравнение (14), которое построено на основе теоремы взаимности работ Максвелла – Бетти для сред с дисторсией (избыточной деформацией) [6]. Данный подход позволяет наиболее объективно осуществлять количественную идентификацию геодинамической опасности.

Количественная идентификация геодинамической опасности объектов НГК

Как отмечалось выше, вопрос формулировки количественных критериев опасности современных деформационных процессов, и в первую очередь для особо важных и экологически вредных объектов, до сих пор остается недостаточно разработанным.

Известно, что непосредственно измеряемой величиной в напряженно-деформируемом состоянии любого объекта являются движения (деформации), а напряжения вычисляются по измеренным смещениям в соответствии с реологическими характеристиками деформируемой среды. Именно поэтому в нормативных документах, которые регламентируют воздействия динамики геологической среды на строительные объекты, в качестве порогового значения используется величина деформационного порога разрушения ε_n .

Это представляется вполне естественным, так как данные о динамике геологической среды получают на основе измерений вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности и их производных (наклонов и относительных деформаций). Принципиально важно помнить, что ε_n – это *безразмерная* величина, характеризующая *относительную* деформацию. В этом случае значение ε_n практически не зависит (в случае однородной деформации) от масштаба измерений.

Однако, если речь идет о воздействии на объект современного аномального геодинамического состояния недр, которое обусловлено, в первую очередь, либо активизацией разломных зон, либо процессами разработки месторождения,

деформационное поле будет в существенной мере контрастно-неоднородным. В этом случае обязательным элементом сравнения наблюдаемых и нормативных величин становится четкое определение величины относительных деформаций в зависимости от типа деформирования (изгиб, сдвиг и т.д.).

В качестве примера можно рассмотреть случаи возникновения СД земной поверхности в зонах разломов, которые проявляют себя в подавляющем большинстве локальными просадками земной поверхности (аномалии типа γ), имеющими практически симметричное распределение вертикальных смещений.

С точки зрения геометрической теории деформаций γ -аномалии – это совокупность направленных навстречу друг другу квазиоднородных наклонов земной поверхности. Обычно оценка относительной деформации достигается путем деления амплитуды аномального смещения земной поверхности на ширину аномалии, т.е. определяется горизонтальный градиент вертикальных смещений. Так, например, для γ -аномалии величина относительной деформации определяется из выражения $\varepsilon_\gamma = \Delta h/L$, где Δh – амплитуда выявленного вертикального смещения земной поверхности, L – ширина аномалии. В этом случае нет никакой разницы в численном выражении между однородным *наклоном* и локальным *изгибом* земной поверхности. Например, если амплитуда вертикального смещения составляет 50 мм, а ширина аномалии – 1 км, то $\varepsilon_\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$. Однако эти оценки являются существенно приближенными.

В работе [3] деформации изгиба описаны формулой

$$\Theta_\gamma = 0.5(\Delta h_1/l_1 - \Delta h_2/l_2), \quad (10)$$

где принято, что изгиб полностью описывается двумя секциями измерений с длинами l_1 и l_2 и превышениями Δh_1 и Δh_2 , соответственно.

В этой связи, предлагается следующая методика вычисления относительных деформаций для аномалий типа γ . Аномальная кривая разбивается на 2 равные части (2 секции), l_1 и l_2 , затем определяются превышения Δh_1 и Δh_2 соответственно и рассчитывается относительная деформация. Так как $l_1 = l_2$, то $\Theta_\gamma = (\Delta h_1 - \Delta h_2)/L$. В случае симметричной аномалии $\Delta h_1 = -\Delta h_2$, учитывая противоположный знак превышений, получим окончательно:

$$\Theta_\gamma = 2\Delta h_{1,2}/L. \quad (11)$$

Таким образом, сравнение традиционной методики расчета относительных деформаций методом градиента вертикальных смещений с предложенной показывает, что

традиционная методика расчета, как минимум, в два раза занижает величину относительной деформации. Так, например, величина относительной деформации по строгой оценке составляет 10^{-4} при вертикальном смещении в 5 см и протяженности аномалии в 1 км.

Как уже отмечалось, СД-процессы в зонах разломов [9] имеют именно такие характеристики деформаций, обнаруживаются повсеместно и поэтому являют собой главный фактор геодинамической опасности для объектов НГК.

Однако даже в такой основательной работе, как монография [5], указывается, что «...в практическом аспекте для обеспечения сохранности поверхностных сооружений, в частности нефтегазопроводов, их (СД-разломов. – Прим. авт.) применение представляется сомнительным». Далее авторы подкрепляют это мнение сведениями из нормативных документов, в которых указывается, что пороговая относительная деформация имеет порядок 10^{-3} , а типичные СД-процессы соответствуют относительной деформации на порядок меньше. Следует подчеркнуть, что выводы авторов не просто несостоятельны, а глубоко ошибочны.

Учитывая, что подобные рассуждения иногда встречаются и у других исследователей, приводим ниже подробную схему учета фактора СД-разломных зон при формулировке критериев геодинамической опасности объектов.

Обычно предполагается, что если ε_n есть деформационный порог разрушения какого-либо из элементов конструкции выбранного объекта (или объекта в целом), то время достижения этого порога (или, иначе, длительность безопасного функционирования объекта) будет равно:

$$\delta t_B = \frac{\varepsilon_n}{\dot{\varepsilon}}, \quad (12)$$

где в знаменателе обозначена среднегодовая скорость деформирования того участка земной поверхности, на котором размещен соответствующий объект НГК.

Если предположить, что за время δt_B может произойти n активизаций (импульсов) СД-процессов длительностью δt_A , которые отделены друг от друга периодами стабилизации δt_C , то очевидно, что

$$\delta t_B = n \cdot t_a + (n + 1) \cdot t_c. \quad (13)$$

Тогда из (12) имеем:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{II}}{n \cdot t_{\alpha} + (n + 1) \cdot t_C} \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что традиционному (унаследованному) подходу к определению предельно допустимой среднегодовой скорости деформации будет соответствовать частный случай: $n = 1$, $\delta t_C = 0$, что автоматически приводит к резкому завышению предельно допустимой среднегодовой скорости и, соответственно, к занижению периода безопасной эксплуатации объекта. В реальной ситуации длительность протекания СД-импульса либо несколько меньше, либо соизмерима с периодом стабилизации (покоя).

В этом случае из (14) имеем:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{II}}{(2n + 1) \cdot \delta t_{\alpha}} \quad (15)$$

Из (15) следует, что при $n = 1$ и $\delta t_A = 0.5$ года допустимая среднегодовая скорость относительной деформации составит величину порядка $6.1 \cdot 10^{-5}$ в год, при $n = 2$ она достигнет $4 \cdot 10^{-5}$ в год, при $n = 3$ она увеличится до $1.4 \cdot 10^{-5}$ в год и т.д. Если зафиксировать среднее время эксплуатации объекта T , то условие его безопасного функционирования можно записать в виде:

$$\delta t_B \geq T \quad (16)$$

А критерий геодинамической опасности, как

$$\delta t_B < T \quad (17)$$

Принимая $T = 50 \div 100$ лет, можно из (15) определить n . Если положить, что среднегодовая скорость СД-процессов имеет порядок $5 \cdot 10^{-5}$, тогда за период эксплуатации объекта может произойти $n = 5 \div 7$ импульсов СД. В этом случае справедливо неравенство (17), и, следовательно, имеет место явная геодинамическая опасность.

Таким образом, при определении геодинамических критериев безопасного функционирования объектов недропользования необходимо различать среднегодовую скорость деформирования земной поверхности, определенную путем деления выявленных смещений на весь период эксплуатации объекта, и конкретную скорость деформационных процессов, которая равна отношению амплитуды аномальной

деформации к длительности аномального импульса. Очевидно, что из (15) следует равенство:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}_{CD}}{(2n + 1)} \quad (18)$$

В этом случае, если принять за порог разрушения (опасную деформацию) величину 10^{-3} , то при среднегодовой скорости деформации на уровне 10^{-4} в год время до наступления аварийной ситуации t будет равно 10 годам.

Данный подход был использован в «Критериях оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия», которые утверждены Роскомэкологией 30 ноября 1992 года.

Однако в этом документе допущена принципиальная неточность. При определении геодинамических критериев ранжирования территории РФ в качестве уровней допустимого деформирования геологической среды взяты *не скорости деформаций*, а сами абсолютные величины деформаций. Кроме того, в перечисленных подходах неявно полагается *непрерывное (равномерное), унаследованное* деформирование земной поверхности в зоне разлома.

Известно, что СД-процессы характеризуются ярко выраженным пульсационным характером. Периоды аномальной активности t_A перемежаются с периодами стабилизации t_C . Поэтому при определении длительности безопасного функционирования объекта следует иметь в виду, что среднегодовая скорость деформирования в условиях неравномерного развития современных геодинамических процессов должна быть рассчитана с учетом как δt_A , так и δt_C .

В работе [6] предлагается следующий подход к построению геодинамических критериев безопасности, учитывающих фактор СД-разломных зон. Используя (18) и (12), можно получить следующую формулу для оценки времени безопасного функционирования объектов недропользования:

$$\delta t_B = \frac{\varepsilon_{II}}{\dot{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon_{II}}{\dot{\varepsilon}_{CD}} (2n + 1). \quad (19)$$

Таким образом, определяя в каждом конкретном случае скорость СД-процессов по результатам прямых измерений, можно, задавая порог прочности и длительность

эксплуатации объекта, определить критерии геодинамической опасности по формулам (16, 17, 18, 19).

Нормативными документами по строительству (СП 11-104-97, СНиП 2.02.01 и др.) приняты следующие предельно допустимые значения при проектировании оснований зданий и сооружений: относительное горизонтальное сжатие или растяжение – 10^{-3} , наклон – $3 \cdot 10^{-3}$, относительная неравномерность просадок земной поверхности – $6 \cdot 10^{-3}$, крен основания – $5 \cdot 10^{-3}$.

В этой связи естественно предположить, что если среднегодовые скорости относительных деформаций достигают величин порядка $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-4}$ в год, то зоны разломов, в пределах которых они выявлены, представляют собой зоны повышенной геодинамической опасности, поскольку за период эксплуатации объекта уровень накопленной относительной деформации может достигнуть (или даже превзойти) нормативные значения.

Аналогичным образом можно оценить и уровень геодинамической опасности в случае, когда имеет место обширное оседание территории разрабатываемого месторождения УВ.

Так, например, при средних размерах месторождения $l = \sqrt{S} = 15\text{--}20$ км опасными просадками земной поверхности территории месторождения следует считать оседания (мульды сдвижения) амплитудой порядка 5–10 м. Подобные смещения встречаются чрезвычайно редко. Отсюда следует, что определять обширные просадки земной поверхности (мульды сдвижения) в качестве главного фактора эколого-промышленной опасности объектов НГК представляется весьма сомнительным.

Таким образом, очевидно, что для всей совокупности нефтегазовых объектов наибольшую и реальную геодинамическую опасность создают современные аномальные деформационные процессы (СД-процессы) в зонах современных активных (опасных) разломов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
2. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1970. 239 с.

3. *Есиков Н.П.* Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной коры. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 183 с.
4. *Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Полоудин Г.А.* Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) // Геология, геофизика и разраб. нефт. и газовых месторождений. 2002. №7. С. 54–60.
5. *Кашиников Ю.А., Ашихмин С.Г.* Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 467 с.
6. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. 220 с.
7. *Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Горн. кн., 2004. 256 с.
8. *Кузьмин Ю.О.* Геодинамический риск объектов нефтегазового комплекса / Российская Газовая Энциклопедия. М.: Большая Рос. Энцикл., 2004. С. 121–124.
9. *Кузьмин Ю.О.* Опасные разломы и эколого-промышленная опасность нефтегазовых объектов // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса: Материалы Междунар. конф. (Москва, 6–8 дек. 2005 г.). М., 2005. С. 102–109.
10. *Кузьмин Ю.О.* Геодинамические аспекты эколого-промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса // Вестн. «Россия. Третье тысячелетие». 2007. С. 110–111. (Безопасность России в глобальной перспективе; вып. 14).
11. *Кузьмин Ю.О.* Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. №11. С. 56–71.
12. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / под ред. В. Мори, Д. Фурментро. М.: Мир, ЭльфАкитен, 1994. 416 с.
13. *Черных В.А.* Гидрогеомеханика нефтегазодобычи. М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2001. 249 с.
14. *Geertsma J.* Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs // J. Petrol. Technol. 1973. Vol. 50. June. P. 734–744.
15. *Segall P.* Stress and subsidence from subsurface fluid withdrawal in the epicenter region of the 1983 Coalinga Earthquake // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. P. 6801–6815.