

УДК 550.34:553.982

**Кузьмин Юрий Олегович**

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
заведующий отделением  
разведочной геофизики  
и прикладной геодинамики,  
Институт физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта РАН,  
123242, Россия, г. Москва,  
Большая Грузинская ул., 10, стр. 1,  
e-mail: [kuzmin@ifz.ru](mailto:kuzmin@ifz.ru)

**ИНДУЦИРОВАННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ  
НЕФТИ И ГАЗА***Аннотация:*

Рассматриваются характерные примеры землетрясений, которые произошли в местах интенсивной разработки месторождений нефти и газа. Показано, что существует два типа сейсмических процессов, происходящих в нефтегазоносных регионах. Первый тип – это землетрясения умеренной интенсивности, когда глубины очагов концентрируются в непосредственной окрестности разрабатываемых пластов. Землетрясения второго типа залегают существенно глубже месторождений и имеют гораздо больший энергетический потенциал. Обсуждаются различные варианты классификации индуцированных землетрясений. Представлен вариант классификации деформационных и сейсмических процессов, индуцированных разработкой месторождений нефти и газа. Предложено землетрясения первого типа именовать техногенными землетрясениями, а второго типа – техногенно-индуцированными землетрясениями. На примере детальной сети сейсмологических наблюдений, которая организована в пределах Ромашкинского нефтяного месторождения, выявлена глубинная иерархия очагов землетрясений. Установлено, что в рамках единой системы измерений однозначно идентифицируются техногенные, техногенно-индуцированные и тектонические землетрясения.

*Ключевые слова:* сейсмические станции; месторождения нефти и газа; техногенная сейсмичность; техногенно-индуцированные землетрясения; деформации разломных зон; разломы фундамента

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.009

**Kuzmin Yuri O.**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor,  
Head of the Department of Exploration Geophysics  
and Applied Geodynamics,  
Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,  
123242, Russia, Moscow,  
10 Bolshaya Gruzinskaya Str., build. 1  
e-mail: [kuzmin@ifz.ru](mailto:kuzmin@ifz.ru)

**INDUCED SEISMIC PROCESSES  
AT OIL AND GAS DEPOSITS***Abstract:*

The paper describes the characteristic examples of earthquakes that occurred in the areas of intensive development of oil and gas deposits. It is shown that there are two types of seismic processes occurring in oil and gas bearing regions. The first type of earthquake is of moderate intensity, when the depths of the foci are concentrated in the immediate vicinity of the layers under development. Earthquakes of the second type occur much deeper than the deposits and have a much greater energy potential. Various options of classification of induced earthquakes are discussed. The paper presents the variant of classification of deformation and seismic processes induced by development of oil and gas deposits. It has been suggested that the first type of earthquakes should be referred to as technogenic earthquakes, and the second type as technogenic-induced earthquakes. The example of a detailed network of seismological observations, which is organized within the Romashkinskoye oil deposit, has revealed a deep hierarchy of earthquake foci. It has been established that technogenic, technogenic-induced, and tectonic earthquakes are uniquely identified within the framework of a unified system of measurements.

*Key words:* seismic stations; oil and gas deposits; technogenic seismicity; technogenic-induced earthquakes; deformations of fault zones; basement faults

**Введение**

Среди различных видов последствий длительного освоения месторождений углеводородов (загрязнение нефтепродуктами гидросферы и почв, загрязнение атмосферы продуктами сгорания попутного газа, разрывы нефте-, газо- и продуктопроводов) внимание специалистов стали привлекать геодинамические последствия освоения месторождений углеводородов, такие как аномальные деформации (просадки) земной поверхности и проявление сейсмической активности в районах нефтегазодобычи. При этом

важно, что многие из них сопровождаются существенным экономическим ущербом [1 – 5].

В настоящее время целенаправленные исследования индуцированных геодинамических процессов проводятся, в первую очередь, на основе детального анализа сейсмологической информации. Только за последнее десятилетие были опубликованы обобщающие работы по изучению индуцированной сейсмичности в районах интенсивной разработки месторождений полезных ископаемых, при заполнении крупных водохранилищ, эксплуатации гидротермальных источников [4, 6 – 8]. Зарегистрированы случаи проявления землетрясений, в том числе сильных, в районах освоения месторождений углеводородов в США, Канаде, Франции, России, Туркменистане, Узбекистане и других регионах. Установлена связь процессов подготовки этих событий с режимом разработки месторождений нефти и газа.

Вместе с тем следует констатировать, что опыта работ по изучению сейсмичности в районах интенсивной разработки месторождений нефти и газа как одной из опасных форм последствий разработки месторождений углеводородов явно недостаточно. До настоящего времени практически нет работ длительного, режимного (мониторингового) характера от начала до поздней стадии разработки месторождений. Не совсем ясными представляются условия подготовки и реализации техногенных сейсмических событий.

Кроме того, весьма загадочным фактом является то, что при прочих равных условиях разработка одних месторождений сопровождается землетрясениями, а разработка других месторождений, хотя и расположенных в той же региональной структурно-тектонической зоне, не сопровождается аналогичными процессами.

Следует особо подчеркнуть, что многолетний (40 и более лет) опыт эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) на территории России не выявил ощутимых сейсмических проявлений, несмотря на циклические перепады давления, обусловленные сезонными отборами и закачками газа. При этом вариации пластового давления достигали величин 10 – 20 МПа, что соизмеримо с изменением давлений при длительной разработке нефтегазовых месторождений. И, наконец, отсутствует однозначная терминология, описывающая разнообразие эффектов индуцированных землетрясений на месторождениях нефти и газа.

В этой связи ниже рассматриваются результаты обобщенного анализа зарегистрированных явлений, предлагается вариант их классификации, который обосновывается на примере детальных сейсмологических наблюдений, проводимых сетью сейсмических станций ПАО «ТАТНЕФТЬ», организованных в пределах гигантского Ромашкинского нефтяного месторождения.

#### *Характерные примеры сейсмических событий на разрабатываемых месторождениях нефти и газа*

В табл. 1 представлен перечень наиболее известных землетрясений, которые произошли в местах интенсивной нефтегазодобычи [1, 3].

Анализ землетрясений, связанных с разработкой месторождений нефти и газа, позволил выявить следующие особенности их проявления:

- сейсмические события на разрабатываемых месторождениях углеводородов возникают как при интенсивном отборе флюида и снижении пластового давления, так и при вторичном воздействии на пласт;

- имеют место сейсмические события с очагами, расположенными в пределах резервуара нефти и газа или в его ближайших окрестностях с магнитудами, не превышающими 3,0 – 4,0;

- существуют значительно более интенсивные ( $M=5,0$  – 5,5 и более) и поэтому наиболее опасные землетрясения. Положение очагов этих землетрясений имеет значительную глубину (5 – 10 км и более) и контролируется разломами. По существу, эти со-

бытия являются тектоническими, но их возникновение инициировано процессами разработки месторождений. Эти события могли бы произойти позже, но интенсивная разработка ускорила наступление финальной стадии процесса их подготовки;

- нет четкой зависимости между началом разработки месторождений углеводородов, количеством отобранного флюида и началом возникновения сейсмической активности.

Таблица 1

| № | Название месторождения, страна                | Глубина резервуара, м | Глубина очага, м | Магнитуда М или интенсивность I в баллах |
|---|---|-----------------------|------------------|--|
| 1 | Газовое месторождение Лак (Франция)           | 3500 – 4500           | 3500             | M=4,2                                    |
| 2 | Нефтяное месторождение Wilmington (США)       | 760 – 1830            | 1500             | M=3,9                                    |
| 3 | Газовое месторождение Strachan (Канада)       | 2850 – 3500           | 4000             | M=3,4                                    |
| 4 | Нефтяное месторождение Sleepy Hollow (США)    | 900 – 1100            | 2000             | M=2,9                                    |
| 5 | Газовое месторождение Snipe Lake (Канада)     | 2150 – 2400           | 9000             | M=5,1                                    |
| 6 | Газовое месторождение Газли (Узбекистан)      | 800 – 1350            | 15000, 25000     | M=6,8; 7,3                               |
| 7 | Ромашкинское нефтяное месторождение (Россия)  | 1500 – 2500           | 5000             | I=6-7 (M=5,5)                            |
| 8 | Нефтяное месторождение Кум-Даг (Туркменистан) | 485 – 1520            | 8000             | I=6-7 (M=5,7)                            |

Как следует из табл. 1, существует две группы техногенных землетрясений. Первая группа (события 1 – 4) характеризуется низким сейсмическим потенциалом, а очаги землетрясений расположены непосредственно в резервуаре или в его ближайших окрестностях. Пространственное распределение очагов носит «диффузный», распределенный характер. Вторая группа (5 – 8) – это довольно сильные сейсмические события, которые расположены существенно ниже и подчас в стороне от разрабатываемого месторождения. Пространственно этот тип землетрясений, как правило, контролируется зонами тектонических нарушений (разломов).

#### *Проблема классификации индуцированных землетрясений*

В работе [1] предлагается к первой группе относить *техногенные* землетрясения, а ко второй – *техногенно-индуцированные*. Техногенные землетрясения не могут происходить без разработки месторождений, а техногенно-индуцированные происходят преимущественно в тех случаях, когда разработка месторождений проводится в потенциально сейсмоактивном районе.

Индуцирование как явление можно понимать как две формы проявления причинно-следственных связей между различными процессами. Любую, например, механическую систему можно вывести из состояния равновесия двумя способами. В первом случае индуцирование – это вынуждение (*forced*), аналогично происхождению вынужденных колебаний (*forced oscillations*) [9]. Во втором случае это наведенные процессы

(induced processes), когда выведение из равновесия механических систем осуществляется малыми, иногда «неочевидными» воздействиями (influences).

Следует особо остановиться на термине «индуцирование». А.В. Николаев [10] при рассмотрении эффектов наведенной сейсмичности употребляет понятие «индуцированный» в смысле «вызванный» (от английского *to induce* – *вызывать, принуждать*). Однако автор данной работы обращает внимание на то, что происхождением термина «индуцированный» мы обязаны Ф. Бэкону, М. Фарадею и Дж. К. Максвеллу, которые ввели термин «индукция» (от английского *the induction* – *наведение*), который описывает процессы выведения из равновесия физических систем малыми, подчас «неочевидными» воздействиями.

Во введении своей книги «Материя и движение» Дж. К. Максвелл писал, что "...бывают случаи, в которых небольшое начальное изменение может произвести очень большие изменения в конечном состоянии системы..." [11]. В этом смысле закон электромагнитной индукции, индуцированное излучение, индуцированные шумом фазовые переходы – это примеры таких воздействий. Естественно, что можно для описания индуцированных процессов использовать и русское значение данного термина. Однако, отдавая дань существующей в физике традиционной терминологии, автор предпочитает сохранить ее и в науках о Земле. В противном случае пришлось бы говорить не о законе электромагнитной индукции, а о законе электромагнитного наведения или о наведенном излучении и т.д.

В работе [4] предложено первую группу землетрясений именовать *индуцированными* землетрясениями, а вторую – *триггерными*. В недавней работе [12] вторую группу землетрясений предложено называть *техногенно-тектоническими*. Различие в терминологии зачастую диктуется вкусовыми лингвистическими предпочтениями авторов терминов. Однако триггерные землетрясения могут происходить на любой глубине, а индуцированные землетрясения не обязательно должны быть рассредоточены по всей площади разрабатываемого пласта (пластов).

#### *Результаты детальных сейсмологических наблюдений на Ромашкинском нефтяном месторождении*

Для иллюстрации последовательной реализации всех типов землетрясений (тектонических, техногенных и техногенно-индуцированных), которые отвечают выявленным эмпирическим свойствам протекания сейсмического процесса, ниже приведена информация о пространственном распределении землетрясений на различных глубинах, которая получена с помощью детальной сейсмической сети ПАО «Татнефть» на гигантском Ромашкинском месторождении нефти.

Сейсмологическая сеть ПАО «Татнефть» включает в себя 15 сейсмических станций с апертурой в 80 км. При этом 5 станций из них, которые расположены в пределах максимальной нефтедобычи, оборудованы скважинными сейсмоприемниками [5]. Этой сетью, расположенной на юго-востоке Татарстана, за время наблюдений с 1996 по 2018 г. зарегистрировано около 250 местных землетрясений различной энергии, преимущественно слабых ( $M=1,0 - 2,0$ ). Однако землетрясение 29 мая 2008 г., которое произошло в пределах измерительной сети, было существенно ощутимым и имело магнитуду порядка  $M \approx 4$ . Динамика сейсмической активности по годам варьируется от 30 – 40 до 12 землетрясений в год, а глубины очагов землетрясений варьируются от 1 до 15 км (рис. 1).

Как видно из рис. 1, распределение количества очагов землетрясений по глубине можно условно разбить на три устойчивых участка: 0 – 4 км, 4 – 7 км, 7 – 15 км. Наибольшее количество очагов землетрясений располагается в одном диапазоне с пиком на глубине 2 – 3 км. Именно в этом диапазоне глубин размещаются нефтеносные пласты, идет отбор нефти и закачка жидкости для поддержания пластового давления. Второй диапа-

зон по количеству очагов значительно уступает первому, отмечается плавное уменьшение числа землетрясений по глубине от 4 до 7 км. Ниже располагается третий диапазон глубин, где распределение числа землетрясений носит случайный характер. Глубже 15 км землетрясения не наблюдаются. Это критическая граница, которая еще требует своего объяснения. Похожая картина наблюдается и в других местах, где ведутся подобные измерения (Воронежский кристаллический массив, Оренбургский полигон на газоконденсатном месторождении и др.).

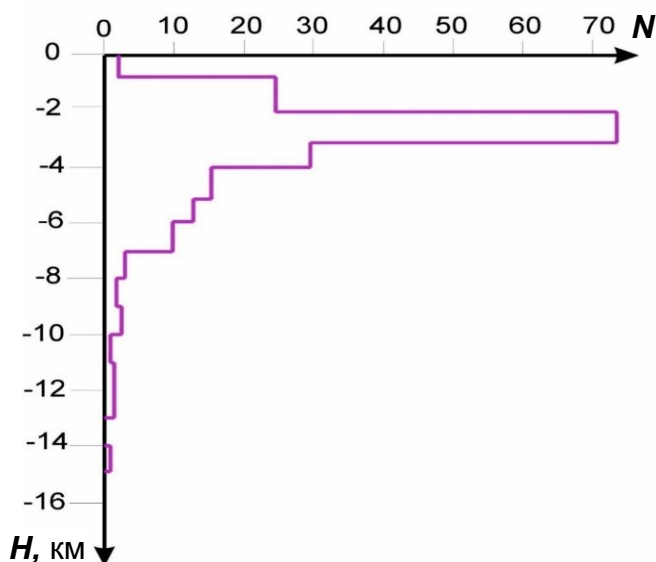


Рис. 1 – Распределение количества землетрясений по глубине

Для установления природы отмеченного распределения ниже приведены карты площадного распределения местных землетрясений, которые разбиты по глубинам на указанные три группы и совмещены с расположением разломов фундамента, который в данном районе находится на глубине 2,5 – 4,0 км.

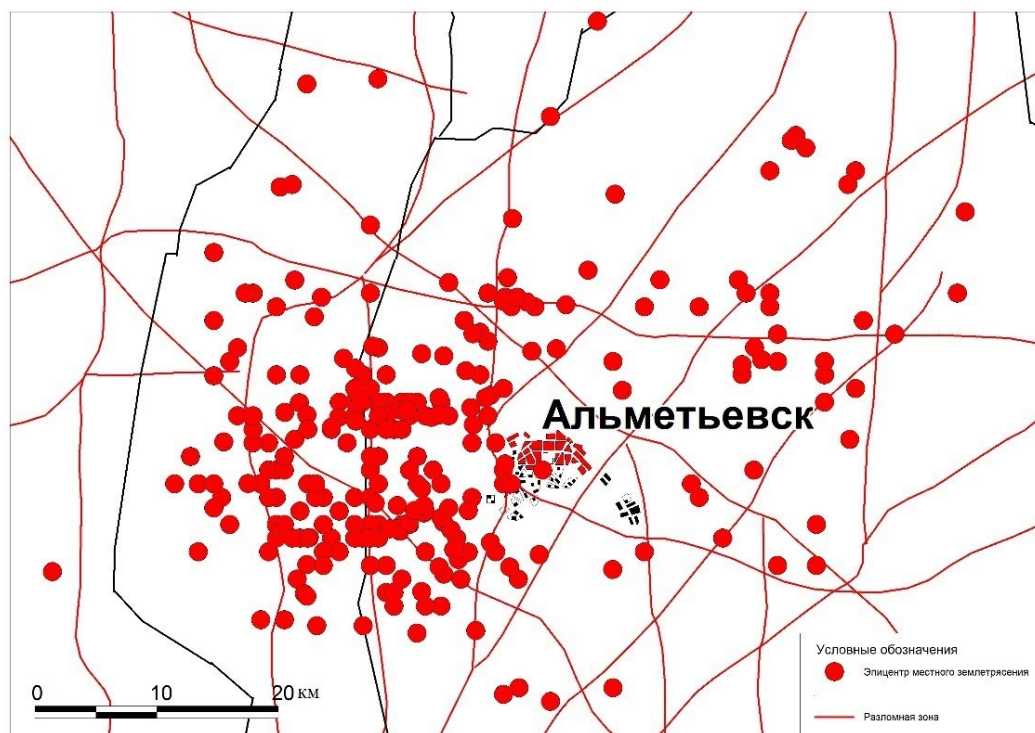


Рис. 2 – Карта эпицентров землетрясений для диапазона глубин 0 – 4 км

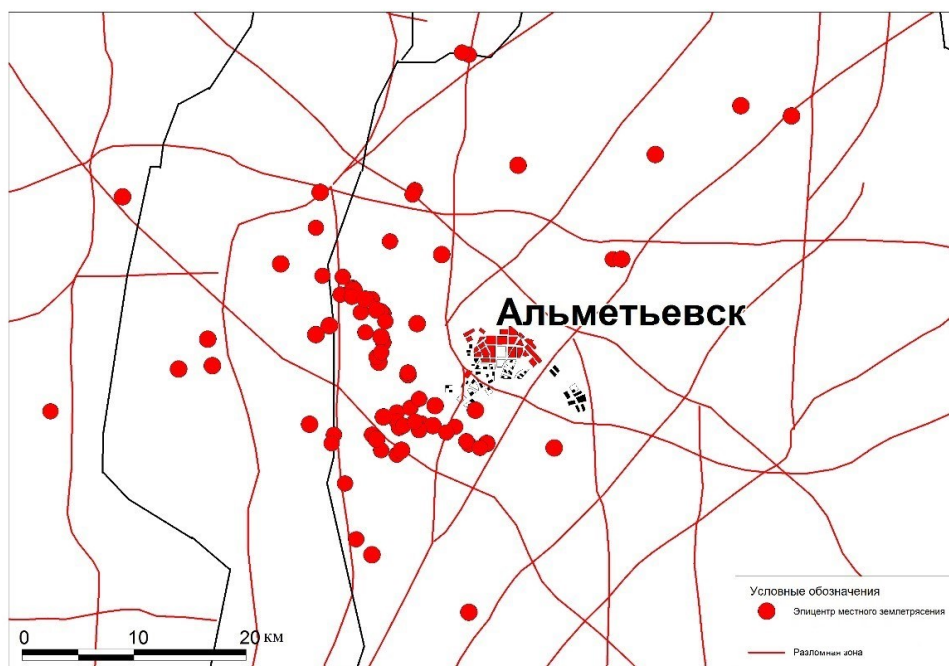


Рис. 3 – Карта эпицентров землетрясений для диапазона глубин 4 – 7 км

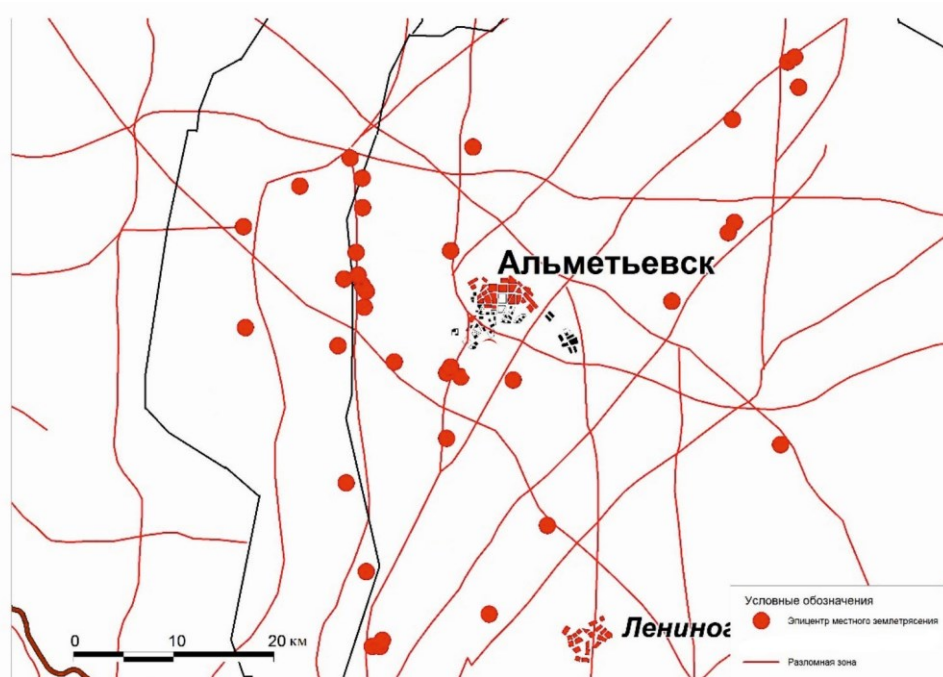


Рис. 4 – Карта эпицентров землетрясений для диапазона глубин 7 – 15 км

Из анализа карт эпицентров, построенных для разных диапазонов глубин, можно сделать следующие выводы:

- эпицентры местных землетрясений (глубины 0 – 4 км) сконцентрированы в пределах Ромашкинского месторождения нефти, носят явно диффузный (хаотично распределенный по площади) характер, не всегда приурочены к разломным зонам и редко происходят за пределами месторождения (рис. 2);

- очаги землетрясений в пределах глубин от 0 до 7 км сконцентрированы преимущественно в пределах Ромашкинского месторождения, а большинство очагов выстраиваются вдоль линий разломов (рис. 3);



- эпицентры местных землетрясений глубже 8 км распределены как в границах Ромашкинского месторождения, так и за его пределами и практически все приурочены к зонам разломов фундамента (рис. 4).

### Обсуждение результатов

Проведенный анализ указывает на существование двух типов сейсмических событий, которые непосредственно связаны с интенсивной разработкой месторождения. Исходя из этого сделан вывод о том, что землетрясения с очагами, расположенными в диапазоне глубин 0 – 4 км, носят исключительно техногенный характер. Землетрясения с очагами, расположенными в диапазоне от 4 до 7 км, являются техногенно- индуцированными, а очаги землетрясений глубже 7 км являются тектоническими и имеют разброс очагов по всей площади наблюдений, которая выходит за пределы области интенсивной нефтедобычи. Кроме того, эти землетрясения пространственно приурочены к разломным зонам кристаллического фундамента.

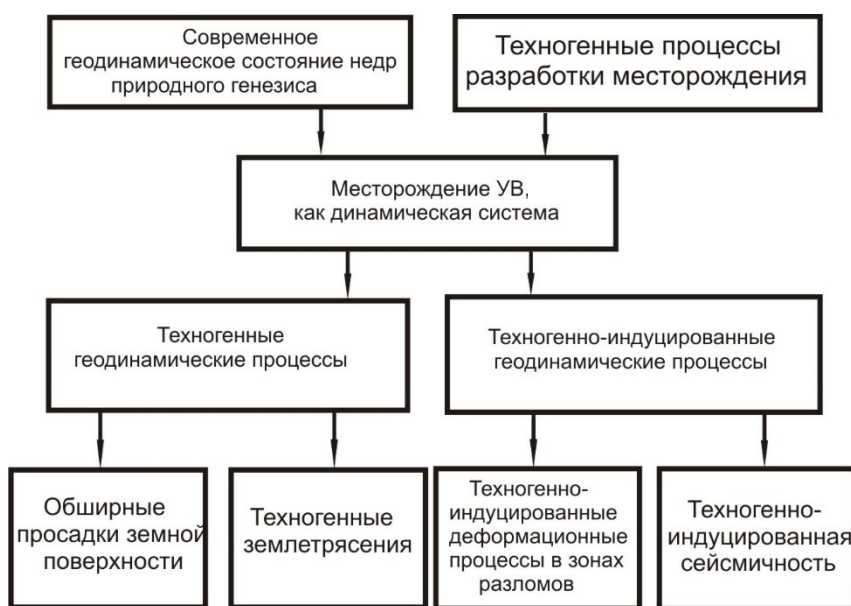


Рис. 5 – Схема формирования геодинамических последствий разработки месторождений нефти и газа

На рис. 5 представлена схема формирования геодинамических последствий разработки месторождений нефти и газа, которая базируется на том, что существуют две группы последствий: техногенная и техногенно-индуцированная. В ней представлены 4 основные формы геодинамических последствий длительной разработки месторождений: обширные просадки территории месторождения, техногенная и техногенно-индуцированная сейсмичность, активизация разломных зон, расположенных в пределах месторождения [1].

Необходимо отметить, что разделение сейсмических последствий разработки месторождений нефти и газа на техногенные и техногенно-индуцированные проводилось по аналогии с деформационными процессами. Главный эмпирический факт, который использован в предложенной схеме, можно проиллюстрировать следующими рассуждениями. Если разработка месторождений не проводится, то и формирование обширных оседаний земной поверхности над месторождением не происходит. Это пример однозначной техногенной деформации. С другой стороны, разломные зоны, расположенные в пределах месторождения, которое не разрабатывается, могут активизироваться, например, по экзогенным или эндогенным причинам. В этом случае деформации разломных

зон не будут связаны с техногенными воздействиями. Но если процесс разработки месторождений возбуждает их деформационную активность, то эти деформации разломных зон можно определить как техногенно-индуцированные [13].

Техногенные землетрясения происходят в непосредственной окрестности разрабатываемого месторождения как в пространстве, так и по глубине. Они имеют невысокий энергетический потенциал. Очаги техногенно-индуцированной сейсмичности могут залегать намного глубже, чем разрабатываемое месторождение, и иметь существенно более высокую энергию, особенно в случае размещения месторождения в пределах сейсмоактивного региона с высоким природным сейсмическим потенциалом. Во многом аналогичные рассуждения были изложены в недавней работе [14], которая посвящена классификации явлений индуцированной сейсмичности. Автор этой работы также рассматривает различные механизмы индуцированной сейсмичности, которую можно отождествить с техногенными и техно-индуцированными землетрясениями.

Вместе с тем следует признать, что деформационные и сейсмические явления имеют существенные отличия. Сейсмический каталог – это каталог конкретных событий (явлений). Каталог измеренных смещений – это каталог фрагментов деформационного явления, которое еще предстоит изучить. Особенно это актуально при анализе временных рядов. Например, каталог часовых измерений наклонов земной поверхности становится полусуточным или суточным только тогда, когда эти наблюдения будут проводиться в течение суток или месяца. Дело здесь не в метрологии или статистической достоверности результатов, а в необходимости зарегистрировать явление полностью.

Вместе с тем представленная классификация достаточно полно отражает известную сейсмологическую информацию и соответствует базовым представлениям геофизики и геомеханики. В этом смысле результаты известных лабораторных геомеханических экспериментов по влиянию жидкости на акустическую эмиссию [15, 16] во многом подобны результатам этой работы. Похожие закономерности наблюдаются и в индуцированной сейсмичности при различных режимах заполнения водохранилищ [6].

Другой пример динамических явлений, к которому может быть применим предлагаемый вариант классификации, – это горные и горно-тектонические удары. Горные удары являются аналогом техногенных землетрясений, а горно-тектонические удары, которые возникают преимущественно в зонах разломов, но под влиянием горных работ, можно соотнести с техногенно-индуцированными сейсмическими событиями.

### *Заключение*

Исследование природы формирования техногенной сейсмичности представляет собой важную научную задачу как с точки зрения физики землетрясений, так и в плане обеспечения геодинамической (сейсмической) безопасности объектов нефтегазового комплекса. Для того чтобы проводить дальнейшие детальные исследования влияния различных режимов разработки нефтяных и газовых месторождений на формирование сейсмических процессов необходимо наличие плотных наблюдательных сейсмологических сетей на различных объектах нефтегазового комплекса, которые бы контролировали индуцированные процессы с повышенной пространственно-временной детальностью.

### **Литература**

1. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю.О. Кузьмин // М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. – 220 с.
2. Кузьмин Ю.О. Геодинамическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем / Ю.О.Кузьмин, А.И. Никонов // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. - М.: Газпром, 1998. – С. 315 – 328.
3. Сидоров В.А. Концепция геодинамической безопасности освоения углеводородного потенциала недр России / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин, А.М. Хитров. -



М.- ИГИРГИ, 2000. – 56 с.

4. Адушкин В.В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. - М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.

5. Современная геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана / Р.С. Хисамов, Н.С. Гатиятуллин, Ю.О. Кузьмин, Р.Х. Бакиров и др. - Казань: «Фэн», 2012. – 240 с.

6. О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия / В.Б. Смирнов, В.О. Михайлов, А.В. Пономарев, К. Агога и др. // Физика Земли. – 2018. – № 4. – С. 100 – 109.

7. Zoback M. D. Reservoir geomechanics / M. D. Zoback // Cambridge Univ. Press. – 2007.

8. Shapiro S.A. Fluid-induced seismicity. / Shapiro S.A. // Cambridge Univ. Press. – 2015. – 276 p.

9. Andronov A. A. Theory of oscillations / A. A. Andronov, C. E. Chaikin // Princeton University Press. – Princeton. – New Jersey. – 1949.

10. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности / А.В. Николаев // Наведенная сейсмичность. - М.: Наука, 1994. – С. 5 – 15.

11. Maxwell J. C. Matter and motion. – London. – Society for promoting Christian knowledge. – 1888.

12. Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения / В.В. Адушкин // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 22 – 44.

13. Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. – № 5. – С. 123 – 138.

14. Doglioni C. A. Classification of induced seismicity / Doglioni C. A. // Geoscience Frontiers. – Vol. 9 (2018) . – P. 1903 – 1909.

15. Потанина М.Г. Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования / М.Г. Потанина, В.Б. Смирнов, А.В. Пономарев, П. Бернар и др. // Физика Земли. – 2015. – № 2. – С. 126 – 138.

16. Ma X. Laboratory experiments simulating poroelastic stress changes associated with depletion and injection in low porosity sedimentary rocks / X. Ma, M.D. Zoback // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2017. – Vol.122. – P. 2478 – 2503.