

УДК 622.276:681.5

Техногенные геодинамические процессы при освоении нефтегазовых месторождений шельфа Баренцева моря

Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Н.А. Калашник

Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. Техногенные геодинамические процессы при эксплуатации нефтегазовых месторождений без учета геомеханических процессов могут приводить и приводят к формированию условий возникновения разрушающих катастрофических явлений, и, как следствие, – к потерям и недоиспользованию запасов нефти и газа. Для решения задач обеспечения геодинамической безопасности реализованы синергетические подходы к изучению геомеханических процессов эволюции открытой нелинейной неравновесной природно-технической системы (ПТС) – эксплуатируемого нефтегазового месторождения. Рассмотрена графическая модель эволюции ПТС по алгоритму чередования линейного и нелинейного деформирования и бифуркаций. На основе разработанной геомеханической модели нефтегазового месторождения, учитывающей пространственно-геометрические и силовые условия флюидонасыщенного массива горных пород, выявлены особенности его напряженно-деформированного состояния, что позволяет прогнозировать развитие деформационных процессов и формирование геодинамического режима при его обустройстве и добыче углеводородного сырья. Для целей обеспечения геодинамической и геоэкологической безопасности обоснована структура геодинамического мониторинга газо/нефтепроводов в Евроарктических условиях.

Abstract. The operation of oil and gas fields without taking into account geodynamical processes can result and, in fact, results in formation of conditions of technogenic geodynamic processes realized in destructive and catastrophic events and, as a consequence, losses and oil and gas reserves underexploited. For providing geodynamical safety synergetic approaches have been developed to study geomechanical processes of the evolution of nonlinear nonequilibrium natural-technical system (NTS) – for operating oil-and-gas deposit. The graphic model of the NTS evolution based on the algorithm that involves interchange of linear and non-linear deformations and bifurcations has been considered. Based on the developed geodynamical model of oil-and-field deposit with spatial geometry and conditions of the fluid-saturated rock mass taken into consideration, the peculiarities of its stress-deformed state have been revealed. This allows to predict the development of the deformation processes and geodynamical regime formation during the field's exploration and production. For providing geodynamical and geoecological safety the structure of geodynamical monitoring of gas/oil pipelines for Euro-Arctic conditions has been justified.

Ключевые слова: Баренцево море, шельф, освоение нефтегазовых месторождений, техногенная геодинамика, геоопасности, идентификация, оценка, мероприятия

Keywords: Barents Sea, shelf, oil and gas deposit development, technogenic geodynamics, geo-hazards, identification, assessment, measures

1. Введение

Перспективы развития Мурманской области и всего Северо-Западного региона Российской Федерации связаны с предстоящей крупномасштабной добычей газа и нефти на шельфе Баренцева моря (месторождения Приразломное, Штокмановское и др.), строительством трубопроводных систем транспортировки нефти и газа через территорию Кольского полуострова, а также сооружением завода по сжижению природного газа (СПГ). Наряду с известными сложными природными арктическими условиями, здесь возможны геодинамические проблемы как при обустройстве месторождений, так и при добыче и транспортировании нефтеуглеводородов. Кольский регион является геодинамически активным: при отработке Хибинских и Ловозерских месторождений произошли индуцированные землетрясения, приведшие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций (*Сейсмичность при горных...*, 2002). При этом область разрушающего воздействия в десятки раз превышала район ведения горных работ. Непосредственно в районе планируемого строительства завода СПГ в начале XX в. произошло землетрясение силой около 7 баллов по шкале Рихтера (*Кративнер*, 2008).

2. Опасные геодинамические проявления

Обустройство и вовлечение в эксплуатацию нефтегазовых месторождений Баренцева и Печорского морей без учета геомеханических процессов может привести к формированию условий

возникновения и реализации разрушающих геодинамических явлений (Калашиник, 2008): оседаний, оползней, землетрясений и, как следствие, к социально-экономическому и экологическому ущербу, потерям и недоиспользованию запасов нефтеуглеводородов. Подтверждением этому является накопленный к настоящему времени мировой опыт как сухопутных, так и морских (шельфовых) нефтегазовых разработок.

По данным Oil&Gas Journal (Кайзер, Пулицфер, 2007), количество аварийных ситуаций на платформах, сооружениях для добычи и хранения нефтеуглеводородов, скважинах, трубопроводах и др., составляет около 3000 случаев, а экономический ущерб превысил 34 млрд \$. Анализ влияния различных факторов на возникновение аварийных ситуаций на морских нефтегазодобытках в Европе показывает, что наибольшее число аварий произошло за счет потери устойчивости, повреждений и разрушений конструкций (36 %), тяжелых погодных условий (7 %), удара (5 %) и др. факторов. При этом отмечается, что фактически по каждой пятой и более аварийной ситуации причина неизвестна (22 %).

Вместе с тем общеизвестным является факт оседания дневной поверхности (а для морских нефтегазодобыток – морского дна) вследствие добычи нефти и газа. Авторами собраны, систематизированы и проанализированы опубликованные данные по инструментально зафиксированным оседаниям более чем на 130 разрабатываемых нефтегазовых месторождениях. Выявлено, что оседание может быть от десятков сантиметров до нескольких метров. На 15 месторождениях в различных регионах зафиксированы вертикальные оседания от 1,5 до 8,7 м. Такие значительные вертикальные проседания, как отмечают многие исследователи, сопровождаются образованием мульды сдвига с горизонтальными перемещениями и оползнями пород к ее центральной части, образованием субвертикальных трещин, уступов и террас, в отдельных случаях достигающих 2-2,5 м (Адушкин, Турунтаев, 2005; Кашиников, Ашихмин, 2007; Касьянова, 2003).

Наиболее ярким примером является месторождение Экофиск, разрабатываемое в Северном море, на котором за более чем 30 лет добычи произошло проседание морского дна над центральной частью месторождения на глубину более 7 м, приведшее к значительным техническим и экономическим последствиям. Вследствие этого проседания морского дна основания ряда платформ и внешняя стенка нефтехранилища оказались недопустимо низкими по отношению к уровню моря, и потребовалось провести работы по наращиванию и подъему оснований платформ и возведению дополнительной, более высокой, внешней стены нефтехранилища. По разным оценкам, затраты на выполнение этих работ превысили 400 млн \$.

Другим характерным примером является разработка нефтяного месторождения Уилмингтон (США) в течение более 40 лет, которая привела к оседанию земной поверхности над месторождением до 8,7 м. Это создало угрозу затопления военно-морской базы Лонг-Бич, которая была построена без учета возможности просадок. Ориентировочная стоимость работ и защитных мероприятий по предотвращению затопления составила в ценах 70-80-х гг. прошлого столетия более 6 млн \$ (Кашиников, Ашихмин, 2007).

Очень важным, а порой и определяющим, геодинамическим фактором на объектах нефтегазодобыток является наведенная сейсмичность. Макропроявления сейсмичности в виде техногенных и индуцированных землетрясений относительно редки, но их разрушающее влияние, а также вызываемый социально-экономический и экологический ущерб, очень велики. Авторами также собрана и проанализирована информация по фактам произошедших техногенных землетрясений на эксплуатируемых нефтегазовых месторождениях, а также по землетрясениям, индуцированным добычей нефти и газа. Выявлено, что землетрясения с магнитудой от 3 до 7 и выше баллов происходят как на газовых, так и на нефтяных месторождениях и могут приводить к катастрофическим разрушениям (Газлийское (Узбекистан), Нефтегорское (Россия), Лак (Франция) и др. (Адушкин, Турунтаев, 2005)).

3. Концепция фундаментальных исследований

На формирование опасных геодинамических процессов, реализующихся в разрушающиеся явления: проседания и смещения пород, землетрясения, а также вызванные ими оползни, пустоты, газовые каналы и выбросы, грязевые вулканы, генерация волн (рис. 1) – влияет большое количество факторов и условий, но в основе этих явлений лежат геомеханические процессы. Именно недооценка влияния геомеханических процессов приводит к формированию условий возникновения необратимых геодинамических явлений, разрушающих скважины, трубопроводы и добывающие устройства и сооружения (Калашиник, 2008; Адушкин, Турунтаев, 2005; Кашиников, Ашихмин, 2007; Касьянова, 2003).

Концепция фундаментальных исследований заключается в следующем: нефтегазодобывающий комплекс с вмещающим его участком геологической среды рассматривается как сложная открытая природно-техническая система (НГ ПТС), геомеханическая эволюция которой осуществляется по известному алгоритму (Мельников и др., 2001) – чередованием стадий линейного и нелинейного деформирования, с вероятностью скачкообразного перехода или бифуркаций. При этом необходимо

подчеркнуть, что речь в данной работе идет именно о геомеханической эволюции НГ ПТС, при которой в результате энергетического взаимодействия природных и техногенных объектов и процессов имеет место пространственно-временная локализация событий, среди которых могут быть и опасные геодинамические явления типа одномоментных катастрофических проседаний, крупномасштабных оползней и техногенных землетрясений.

Концептуальная модель геомеханической эволюции нефтегазовой природно-технической системы (НГ ПТС) показана на рис. 2. При этом основным управляющим параметром, в соответствии с подходами Летникова Ф.А. (Летников, 2004), принята энергия W . На начальном этапе (t_1-t_2) эволюция НГ ПТС идет

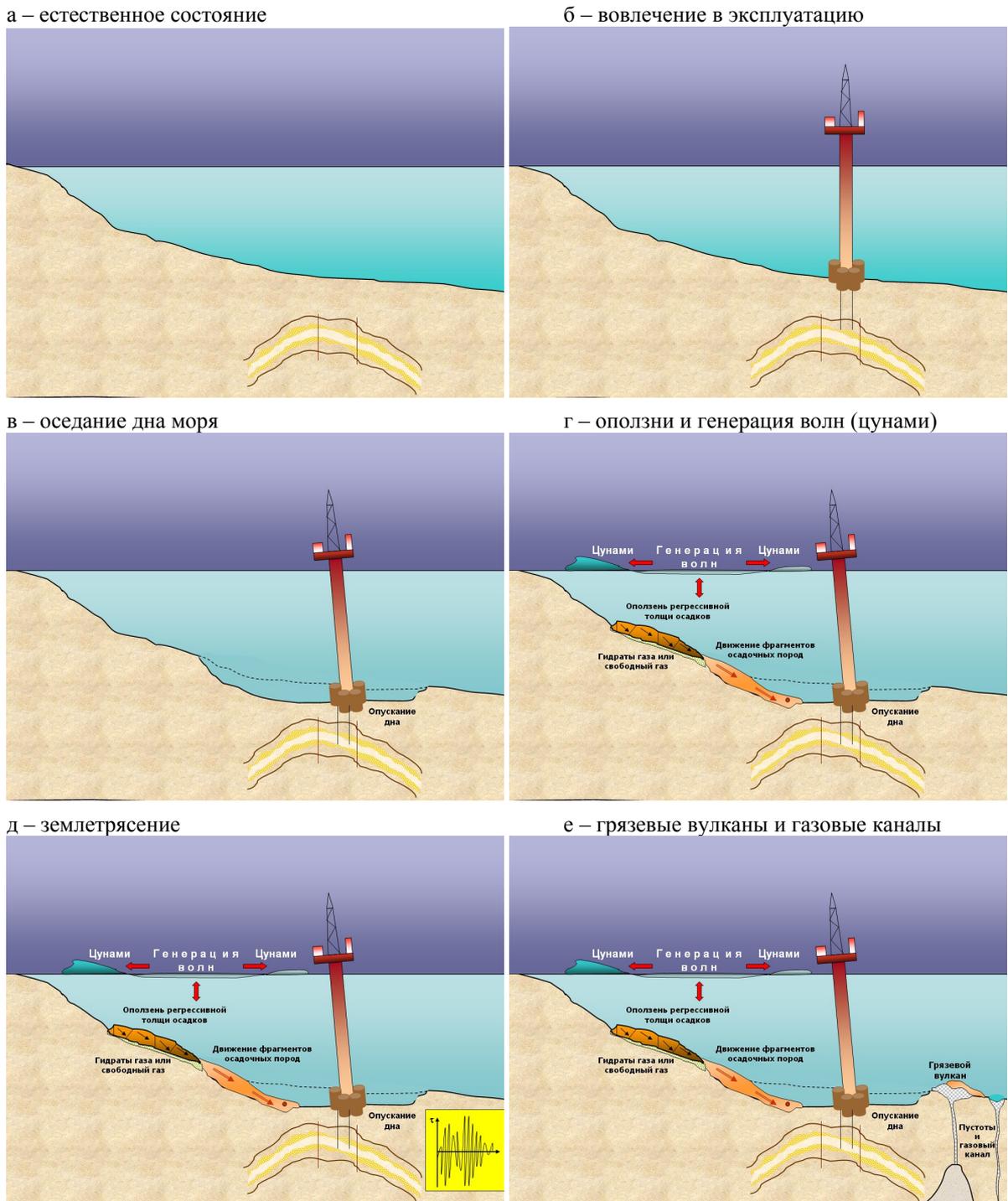
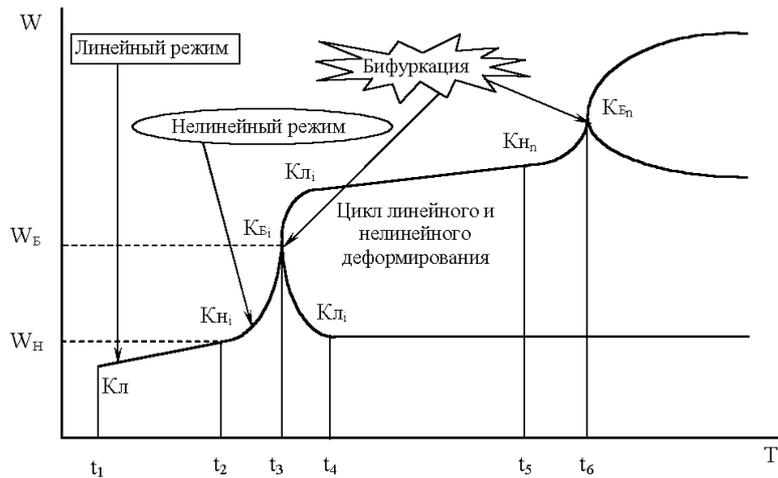


Рис. 1. Модельное отображение геодинамических процессов при отработке морских нефтегазовых месторождений

Рис. 2. Концептуальная модель геомеханической эволюции НГ ПТС



в устойчивом линейном детерминированном режиме. Параметры этого режима обеспечивают адаптацию НГ ПТС к конкретным условиям геологической среды и могут прогнозироваться на основе геомеханической модели массива горных пород с учетом технологических и экономических императивов. Адаптация – в определенной мере процесс прогнозируемый, поскольку параметры этого режима меняются в заранее определенных пределах, силовые и граничные условия, как правило, известны и могут адекватно задаваться для модельных исследований.

Аналитические и численные методы геомеханики на основе информации о начальных свойствах, структуре и напряженно-деформированном состоянии массива и продуктивных пластов/коллекторов позволяют прогнозировать параметры адаптации НГ ПТС на начальных стадиях освоения нефтегазового месторождения. Но надежность этого прогноза определяется достоверностью исходной информации и адекватностью расчетных моделей физической природе процессов, протекающих в геомеханическом пространстве НГ ПТС (Кашиков, Ашихмин, 2007; Мирзаджанзаде и др., 2005).

Когда управляющий параметр W достигает предельных значений W_n (точка K_{Hn} на рис. 2), НГ ПТС переходит в стадию нелинейного развития (интервал t_2-t_3) – стадию неустойчивости, которая завершается бифуркацией, т.е. ветвлением путей эволюции при переходе через пороговое состояние (точка K_{Bn}). Термин "бифуркация" иногда заменяют термином "катастрофа", что в нефтегазовом деле более соответствует характеру рассматриваемых процессов, поскольку одной из ветвей дальнейшего развития такой системы может быть одномоментное проседание, крупномасштабный оползень или техногенное землетрясение. В период t_3-t_4 идет скачкообразное развитие системы с активной диссипацией энергии и образованием новых структур (нисходящая ветвь $K_{Bn}-K_{Ln}$), или аккумуляция энергии (восходящая ветвь $K_{Bn}-K_{Ln}$). Затем, при условии притока новой порции энергии, цикл повторяется (интервал t_4-t_6) и т.д.

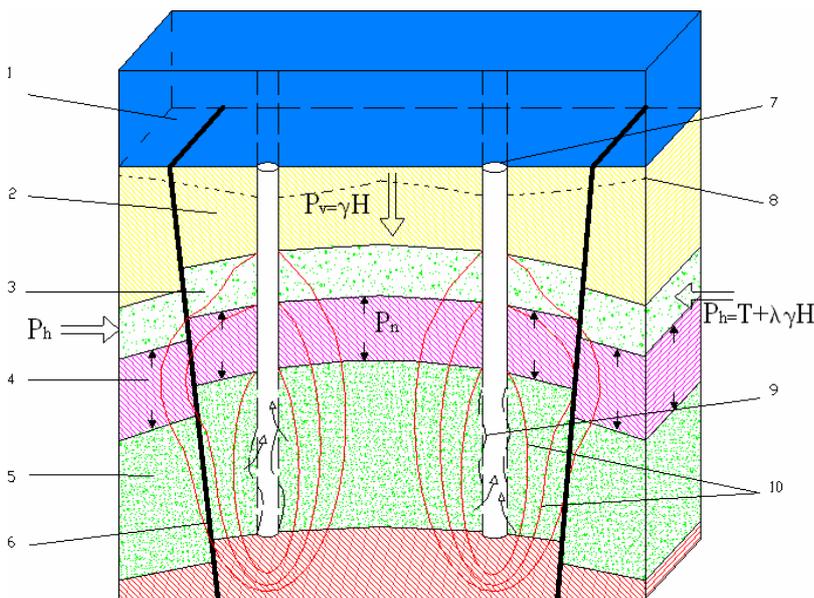


Рис. 3. Геомеханическая модель разрабатываемого нефтегазового месторождения

Условные обозначения:

- 1 – толщина воды;
- 2 – массив горных пород;
- 3 – пласт неустойчивых пород;
- 4 – глинистый пропласток;
- 5 – продуктивный пласт;
- 6 – тектонические разломы;
- 7 – обсадные колонны (скважины);
- 8 – оседание дна;
- 9 – изгиб обсадной колонны (поперечный/продольный);
- 10 – изолинии напряжений;
- P_n – пластовое давление,
- $P_v = \gamma N$ – породное давление;
- $P_h = T + \lambda \gamma N$ – горизонтальное давление с учетом тектонической составляющей

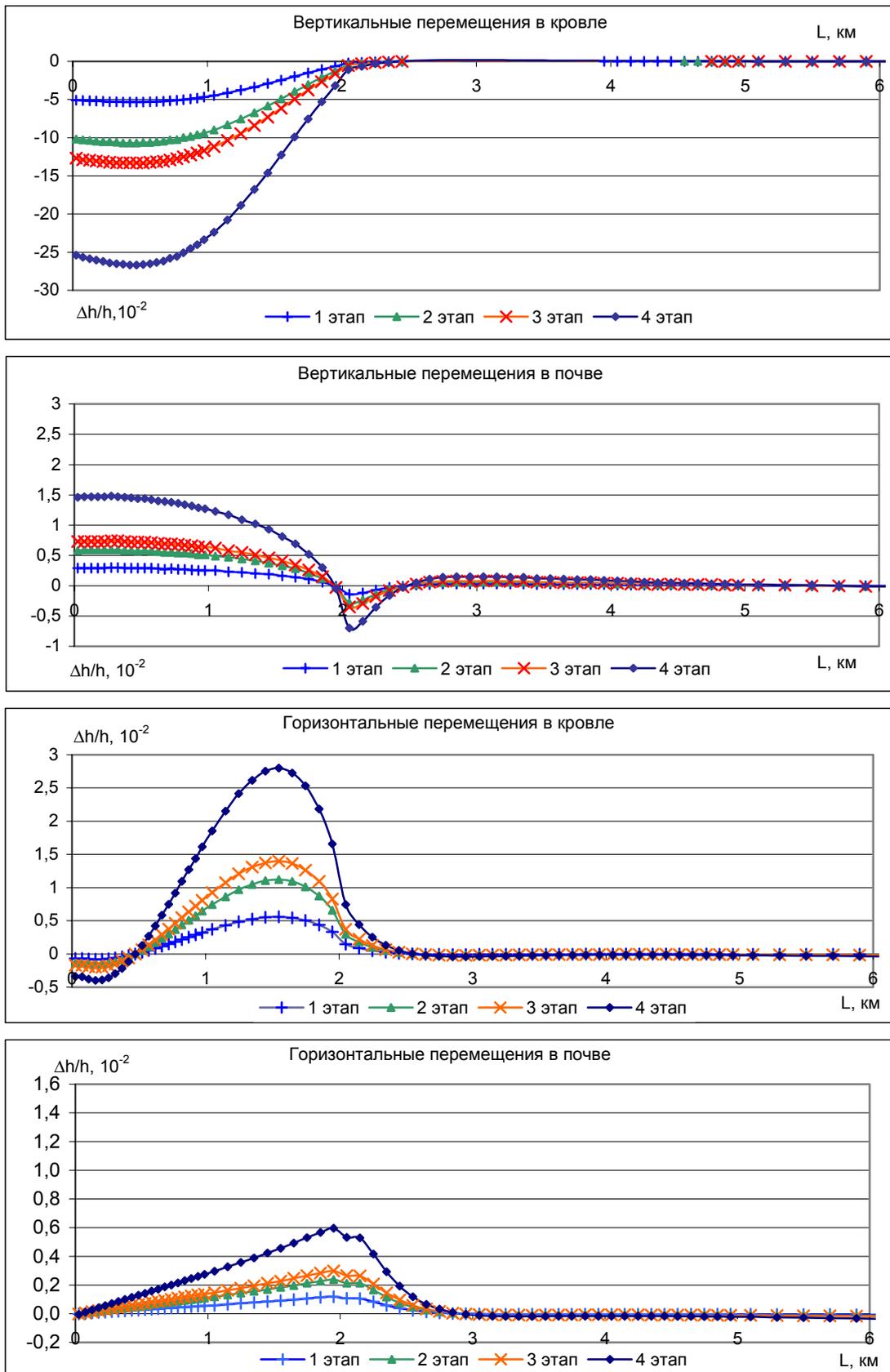


Рис. 4. Графики вертикальных и горизонтальных перемещений: кровли, почвы
 1 – $\Delta p/p_0 = 0,1$; 2 – $\Delta p/p_0 = 0,2$; 3 – $\Delta p/p_0 = 0,25$; 4 – $\Delta p/p_0 = 0,5$

4. Моделирование деформационных процессов

На основе имеющихся данных и выполненных нами исследований (Калашиник, Калашиник, 2007) разработана геомеханическая модель вовлекаемого в эксплуатацию шельфового нефтегазового месторождения (применительно к Штокмановскому месторождению), схема которой представлена на рис. 3. Модель в первом приближении адекватно отражает наиболее вероятное сочетание пространственно-геометрических параметров, внутренних и внешних условий и силовых усилий, а также формирующихся в флюидонасыщенном массиве пород основных геомеханических и природно-технических процессов. Модель содержит продуктивный пласт, расположенный в согласно залегающей антиклинальной литологической толще. Вертикальное давление P_v на пласт определяется весом налегающих толщ пород и может изменяться от гидростатического до литостатического ($P_v = \gamma H$), горизонтальные усилия P_h могут изменяться от минимальных (за счет бокового отпора ($P_h = \lambda \gamma H$) до максимальных, обусловленных современными тектоническими движениями земной коры ($P_h = T + \lambda \gamma H$). Внутрипластовое давление P_n (давление флюида), также как и параметры физико-механических свойств продуктивного пласта и породного массива, принимаются по данным натурных геолого-геофизических определений.

Численное моделирование осуществлялось на основе методических подходов, реализуемых с использованием метода граничных элементов (Крауч, Старфилд, 1987). Рассматривались следующие варианты: $\Delta p/p_0 = 0,1; 0,2; 0,25; 0,5$ при $L/H = 1, 2, 3, 4$ (p_0 – исходное внутрипластовое давление флюида, Δp – снижение пластового давления за счет откачки флюида, L – протяженность (в плане) зоны откачки, H – глубина от поверхности до кровли продуктивного пласта). Для каждого варианта рассчитывались величины вертикального перемещения кровли (верхнего контакта) и почвы (нижнего контакта продуктивного пласта), а также поверхности (морского дна).

5. Результаты моделирования

Анализ результатов моделирования показал, что для всех рассмотренных вариантов характер деформирования кровли и почвы продуктивного пласта и результирующего проседания поверхности (морского дна) идентичен. На рис. 4 приведены расчетные зависимости проседания кровли и поднятия почвы продуктивного пласта от этапов (стадий) добычи флюида и соответствующего снижения пластового давления флюида. Происходящее при этом уплотнение продуктивного пласта (коллектора) линейно зависит от степени снижения внутрипластового давления (рис. 5) и нелинейно – от увеличения зоны откачки флюида.

Объемное уплотнение продуктивного пласта может достигать 30 %, вследствие чего формируется линейно-регрессивный прогиб (проседание) морского дна и значительные субгоризонтальные деформации и перемещения придонных слоев грунтов и пород (рис. 6).

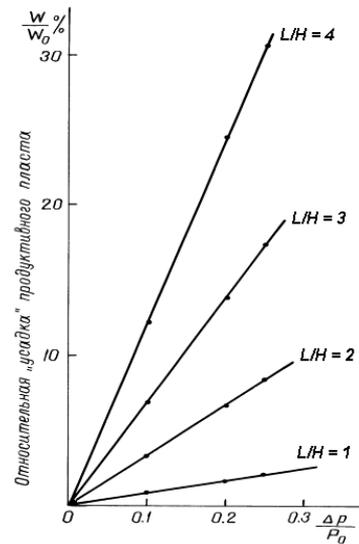


Рис. 5. Графики зависимости степени уплотнения продуктивного пласта от снижения порового давления

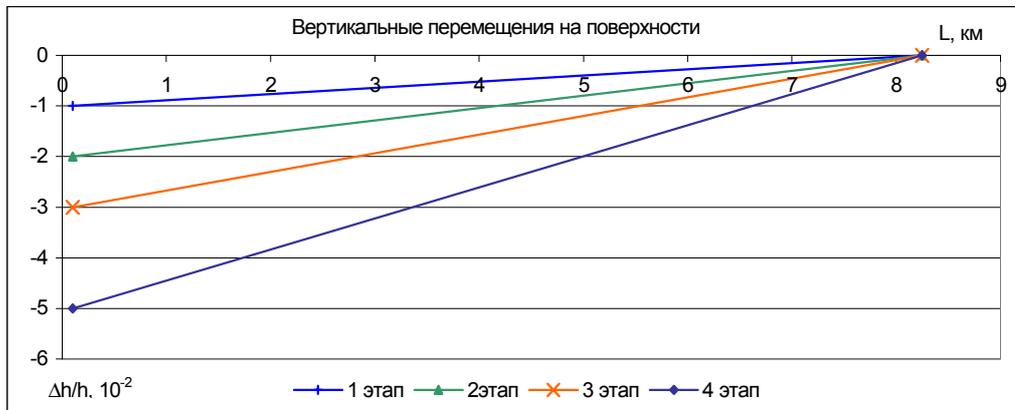


Рис. 6. Графики перемещений поверхности
1 – $\Delta p/p_0 = 0,1$; 2 – $\Delta p/p_0 = 0,2$; 3 – $\Delta p/p_0 = 0,25$; 4 – $\Delta p/p_0 = 0,5$

Рис. 7. Профили по участкам трассы магистрального газопровода Штокман – Волхов:

а) подводная часть Штокман-Териберка;

б) сухопутная часть (в пределах Кольского полуострова).

Овалами выделены потенциально опасные участки



6. Обсуждение результатов

На основании вышеизложенного можно выделить следующие результаты:

- установлены модельные закономерности деформирования флюидосодержащего массива вследствие откачки газа, заключающиеся в объемном уплотнении продуктивного пласта до 30 %, приводящем к линейно-регрессивному прогибу (проседанию) морского дна и значительным субгоризонтальным деформациям и перемещениям придонных слоев грунтов и пород;
- величины максимального оседания поверхности морского дна, кровли продуктивного пласта, поднятие почвы и относительная "усадка" его линейным образом зависят от величины снижения порового давления (можно сказать, от степени откачки газа) и существенно нелинейным образом – от отношения L/H (той части продуктивного пласта, в которой произведена откачка).

Столь высокие вертикальные и горизонтальные деформации не могут не приводить к развитию опасных геодинамических процессов, обуславливающих потери устойчивости, нарушения прочности и разрушения основных конструкций и объектов нефтегазодобычи и транспортирования углеводородов, и в итоге приводить к аварийным ситуациям.

7. Мониторинг геодинамических процессов

На основе анализа тектонофизических и батиметрических данных по подводной части трассы магистрального газопровода со Штокмановского газоконденсатного месторождения и тектонических и сейсмологических данных по сухопутной части трассы газопровода по территории Кольского полуострова выделены потенциально опасные участки (рис. 7) и сформированы подходы к организации геодинамического мониторинга его сооружения и эксплуатации (рис. 8) (Мельников, Калашник, 2008).

8. Заключение

Для обеспечения геодинамической безопасности работ и устойчивости конструкций и нефтегазовых объектов Баренцрегиона и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья необходимо проведение специальных геомеханических исследований, включающих в себя: оценку геодинамического режима региона добычи и хранения углеводородов, а также по трассам трубопроводов; оценку исходного напряженно-деформированного состояния пород коллектора и вмещающего массива; тенденции и механизмы (модели) деформирования их вследствие добычи нефти/газа; оценку геодинамических рисков; обоснование геобезопасного расположения нефтегазообъектов и разработку превентивных геобезопасных мероприятий по обеспечению безопасности добычных и транспортных работ и устойчивости основных конструкций и сооружений; геодинамический мониторинг добычи и транспортирования углеводородного сырья.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-05-00145).

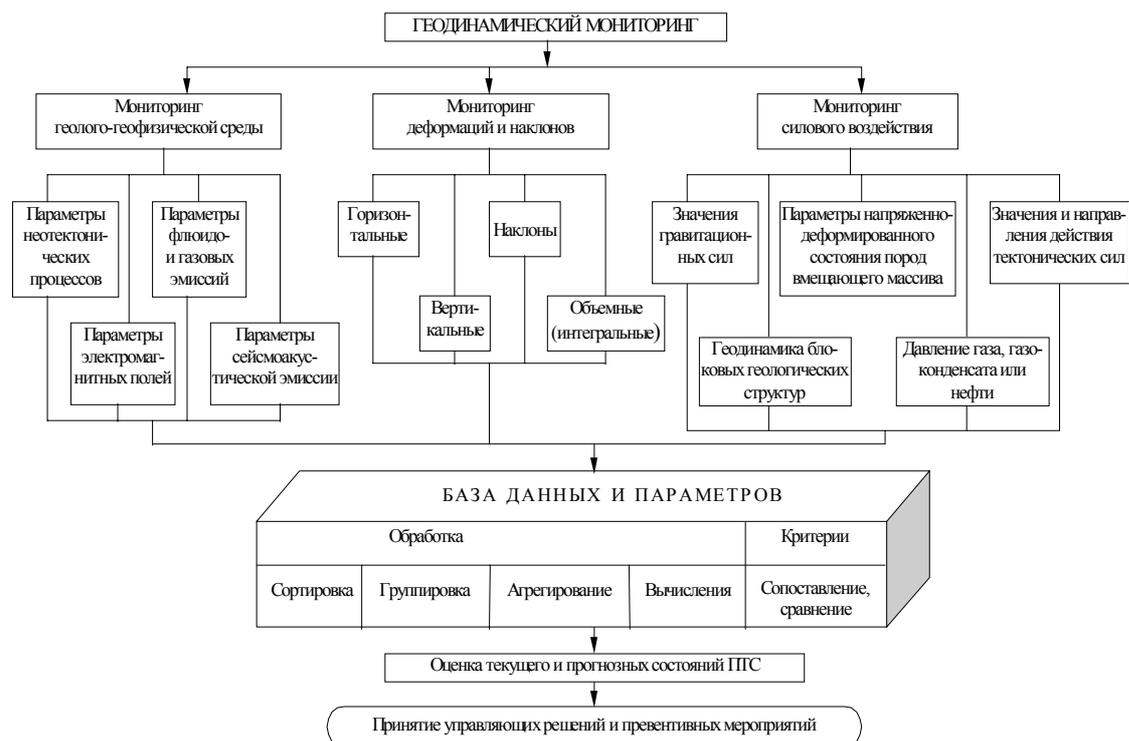


Рис. 8. Структура геодинамического мониторинга природно-технической системы – обустраиваемого и эксплуатируемого шельфового месторождения углеводородов

Литература

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М., ИИЭЖ, 252 с., 2005.
- Кайзер Марк Дж., Пулцифер Аллан Г. Риски и потери при морской добыче. *Oil&Gas Journal*, N 6(9), с.96-105, 2007.
- Калашник А.И. Геодинамико-экономические риски освоения шельфовых месторождений нефтеуглеводородов Баренцрегиона. *Тр. 8-го Международного Форума ТЭК. СПб.*, с.388-392, 2008.
- Калашник А.И., Калашник Н.А. Вопросы геомеханики при добыче углеводородного сырья в Баренцрегионе. В сб.: *Роль геомеханики в устойчивом развитии горной промышленности и гражданского строительства. Межд. конф. 11-15 июня 2007. Болгария. Несебыр*, с.99-105, 2007.
- Касьянова Н.А. Экологические риски и геодинамика. М., *Научный мир*, 332 с., 2003.
- Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. М., *Недра*, 467 с., 2007.
- Крапивнер Р.Б. О неотектонической активности и сейсмической активности Баренцевоморского шельфа. *Тр. IV международной научно-практической конференции "Нефть и газ Арктического шельфа. Шельф Арктики: стратегия будущего" 12-14 ноября 2008 г., Мурманск*, 2008.
- Крауч С., Старфилд А. Метод граничных элементов в механике твердого тела. М., *Мир*, 326 с., 1987.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том "Тектоника и геодинамика". СПб., *ВСЕГЕИ*, с.134-139, 2004.
- Мельников Н.Н., Калашник А.И. Геодинамические риски освоения нефтегазовых месторождений Баренцрегиона и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья. *МурманшельфИнфо, ООО "Ресурсный центр"*, № 4, с.13-17, 2008.
- Мельников Н.Н., Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Мальцев В.А. Прогноз и профилактика горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений с позиций нелинейной геодинамики. *ФТПРПИ*, № 4, с.17-29, 2001.
- Мирзаджанзаде А.Х., Аметов И.М., Ковалев А.Г. Физика нефтяного и газового пласта. Москва-Ижевск: *Институт компьютерных исследований*, 280 с., 2005.
- Сейсмичность при горных работах. *Апатиты, КНЦ РАН*, 325 с., 2002.