

## О НЕОБХОДИМОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

*академик Н.Н. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук А.И. КАЛАШНИК,  
науч. сотр. Н.А. КАЛАШНИК*

*ФГБУН Горный институт Кольского научного центра РАН (Гои КНЦ РАН), г. Апатиты,  
e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru*

### ВВЕДЕНИЕ

Западный сектор Российской Арктики в ближайшей перспективе будет являться крупным стратегическим центром добычи и транспортирования нефтеуглеводородов (Каминский и др., 2012; Мельников, Калашник, 2011). Вводится в эксплуатацию Приразломное нефтяное месторождение, принимаются инвестиционные решения и проводятся предпроектные изыскания для реализации Штокмановского проекта: обустройство месторождения, трубопроводная доставка газа и газоконденсата от подводного добычного комплекса к побережью Кольского полуострова, строительство завода по сжижению природного газа в п. Териберка (в 100 км от г. Мурманска), строительство сухопутной части трубопровода от п. Териберка до г. Волхова с подключением к трубопроводу NordStream. Рассматриваются варианты трубопроводного транспортирования нефти с месторождений Западной Сибири в порт г. Мурманска.

### ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Наряду с известными сложными арктическими условиями, здесь возможны природно-техногенные геодинамические проблемы как при обустройстве месторождений, так и при добыче и транспортировании нефтеуглеводородов (Мельников, Калашник, 2011; Мельников, Калашник, 2009; Адушкин, Турунтаев, 2005; Механика горных пород..., 1994; Дмитриевский и др., 2009; Супруненко, Сулова, 2012; Калашник и др., 2011). Северо-восточная часть Балтийского щита, куда входит и Кольский полуостров, является геодинамически активной: здесь инструментально зафиксированы современные интенсивные поднятия земной коры, четко выделяются сейсмически активные Мурманская и Кандалакшская сейсмогенные зоны, в пределах которых происходят землетрясения магнитудой до 3–4 (Годзиковская и др., 2010). Непосредственно в районе планируемого строительства завода СПГ в начале XX в. произошло сильное землетрясение. В центральной части Кольского полуострова, вследствие крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерских месторождениях, произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 4, приведшие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций. При этом область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район ведения горных работ.

## МИРОВОЙ ОПЫТ

Мировой опыт показывает, что на морских нефтегазопромыслах по разным причинам возникают чрезвычайные ситуации и аварии, которые приводят к социально-экономическим последствиям в виде непредвиденных сверхпланируемых финансовых затрат и ущерба. Это обусловлено прежде всего особенностями освоения шельфовых и морских нефтегазовых месторождений, среди которых можно выделить следующие:

- используются специальные дорогостоящие сооружения (платформы различных видов, эстакадные площадки, специальные суда, плавучие эксплуатационные палубы, подводные модули и другие) и технические средства, обеспечивающие функционирование нефтегазопромысловых объектов, добычу, временное хранение и трубопроводное транспортирование углеводородного сырья по дну моря. Повреждения и потеря функциональности этих сооружений требуют дорогостоящего ремонта и дополнительных финансовых затрат для вывода их на рабочий режим и ликвидации последствий аварий;

- нефтегазопромысловые объекты постоянно подвергаются значительным внешним нагрузкам: движение воды (течения, волны, приливные явления), ветровые нагрузки, ледовые нагрузки и айсберги (для арктических морей), природные и вызванные извлечением нефти/газа деформационные процессы, сейсмические явления и др., которые могут создавать чрезвычайные ситуации, вплоть до аварий. Для снижения воздействия этих нагрузок необходимо применение специальных защитных сооружений и превентивных мероприятий, что приводит к удорожанию проекта в целом;

- весь комплекс нефтегазопромысловых работ концентрируется в жестко ограниченном пространстве (например, на платформе) и выполняется в стесненных условиях в автономном, зачастую весьма удаленном от обеспечивающих береговых структур, режиме. Жизнеобеспечение персонала, работ и нефтегазовых объектов в целом также требует дополнительных финансовых затрат;

- используемые на шельфовых нефтегазовых объектах скважины и трубопроводы очень чувствительны к незначительным деформациям и смещениям, причем сложности в материально-техническом обеспечении и их труднодоступности делают даже обычные простои или ремонтные работы такого оборудования весьма дорогостоящими (свыше 150 тыс. \$ в день), а в случае аварии приводят к значительным социально-экономическим последствиям (Калашник и др., 2011; Кайзер, Пулцифер, 2007; Адушкин, Турунтаев, 2005; Механика горных пород..., 1994);

- линейные протяженные объекты (нефте- и газопроводы) пересекают тектонические разломы, аномалии рельефа, водные объекты и т.п., что предопределяет различную степень их нагружения и требования по обеспечению их прочности и функциональности.

Накопленный к настоящему времени мировой опыт морских (шельфовых) нефтегазовых разработок (Мельников, Калашник, 2009; Кайзер, Пулцифер, 2007; Калашник, Калашник, 2013; Механика горных пород..., 1994; Мельников, Калашник, 2010) показывает, что количество аварийных ситуаций на платформах, сооружениях для добычи и хранения нефтеуглеводородов, скважинах, трубопроводах и др. составило около 3500 случаев, а экономический ущерб превысил 50000 млн долларов США. Наибольшее число случаев произошло на платформах (35 %), трубопроводах (26 %) и скважинах (20 %) (рис. 1).

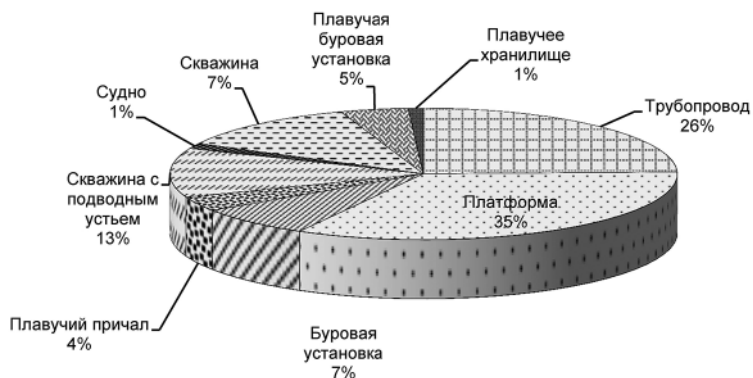


Рис. 1. Подверженность нефтегазовых объектов отказам и авариям (Кайзер, Пулцифер, 2007).

Наиболее ярким примером является проседание морского дна над центральной частью месторождения Экофиск, разрабатываемого в Северном море, достигшее за 30 лет добычи 9 м и приведшее к значительным техническим и экономическим последствиям (Мельников, Калашник, 2009; Механика горных пород..., 1994). Вследствие проседания основания шести 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. Значительное проседание дна моря также привело к деформациям и повреждениям уложенных на дне моря трубопроводов и конструкций; в самой толще перекрывающих продуктивный коллектор пород были повреждены эксплуатационные скважины (произошли разрывы в зонах цементирования, были сплюснуты или разрушены обсадные трубы). Для ликвидации повреждений в течение нескольких лет было выполнено более 70 повторных ремонтных работ, затраты на которые, по разным оценкам (Мельников, Калашник, 2009; Калашник, Калашник, 2013; Механика горных пород..., 1994), превысили 400 млн. долларов США.

Другой характерный пример, получивший широкую мировую огласку и приведший к огромным экологическому и социально-экономическому ущербу, — авария в Мексиканском заливе на платформе Deerwater Horizon, принадлежащей британской компании British Petroleum (Разбор полетов..., 2010). Платформа Deerwater Horizon представляла собой буровую установку 5-го поколения, RBS-8D дизайна, предназначенную для сверхглубоководного морского бурения на перспективном слое Макондо в 80 км от юго-восточного побережья Луизианы. Установка должна была произвести начальное бурение, после чего другие установки должны были быть использованы для добычи нефти из этой скважины. Платформа обслуживалась экипажем из 130 человек. 20 апреля 2010 г. произошел выброс из скважины и взрыв метана, в результате чего буровая загорелась. Попытки потушить пожар были неудачными, и 22 апреля, после 36-часового пожара, Deerwater Horizon затонула и опустилась на дно залива на глубину 1500 м в 400 м к северо-западу от пробуренной скважины. Вследствие аварии 11 человек погибли, 17 получили ранения. В воды залива из скважины вытекло почти 5 млн баррелей нефти. На поверхности воды образовалось нефтяное пятно, которое постепенно достигло береговой линии всех пяти штатов, располо-

женных на побережье Мексиканского залива. На сегодняшний день убытки British Petroleum составили уже 12 млрд долларов на ликвидацию последствий экологической катастрофы и компенсации потерпевшим. Образовавшийся в результате разлив нефти был признан самой масштабной экологической катастрофой в истории США.

### КОНЦЕПЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Системный анализ и обобщение опубликованных исследований позволяют сформулировать общую концепцию решения задач геодинамической безопасности нефтегазообъектов в регионе Баренцева моря (Мельников, Калашник, 2011; Мельников, Калашник, 2009; Калашник, 2013а; Калашник, 2013б; Адушкин, Турунтаев, 2005; Мельников и др., 2010). Природное воздействие на нефтегазообъект подразумевает действие гравитационных и тектонических сил, эффекты от современных движений земной коры, процессы по активным разломам, природные землетрясения и др. (рис. 2).

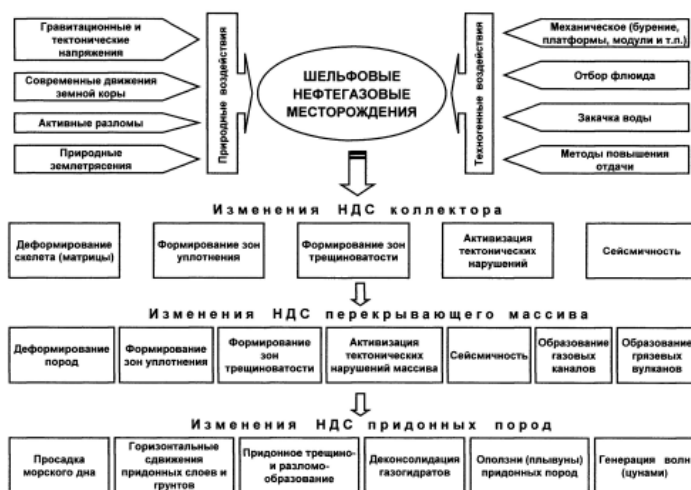


Рис. 2. Воздействие на шельфовое нефтегазовое месторождение и результирующие геомеханические и геодинамические процессы.

Техногенное воздействие, соответственно, обусловлено механическим бурением, отбором флюида, закачкой воды и/или другими методами повышения нефтегазоотдачи. Совместное интегрированное воздействие приводит к изменению напряженно-деформированного состояния пород коллектора и развитию геодинамических процессов (деформирование скелета, формирование зон уплотнения и разуплотнения, образование микротрещин, микросейсмичность и т.п.) перекрывающего массива (деформирование пород, формирование зон уплотнения и разуплотнения, активизация тектонических нарушений, сейсмичность, вплоть до образования грязевых вулканов и газовых каналов) и придонных пород (просадка морского дна, сдвигание придонных грунтов и пород, деконсолидация газогидратов, оползни, генерация волн и цунами) (рис. 3).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Конечно, на формирование этих опасных геодинамических процессов, приводящих к разрушающим явлениям, влияет большое количество факторов и условий, но в основе этих явлений лежат геомеханические процессы (Мельников, Калашник,

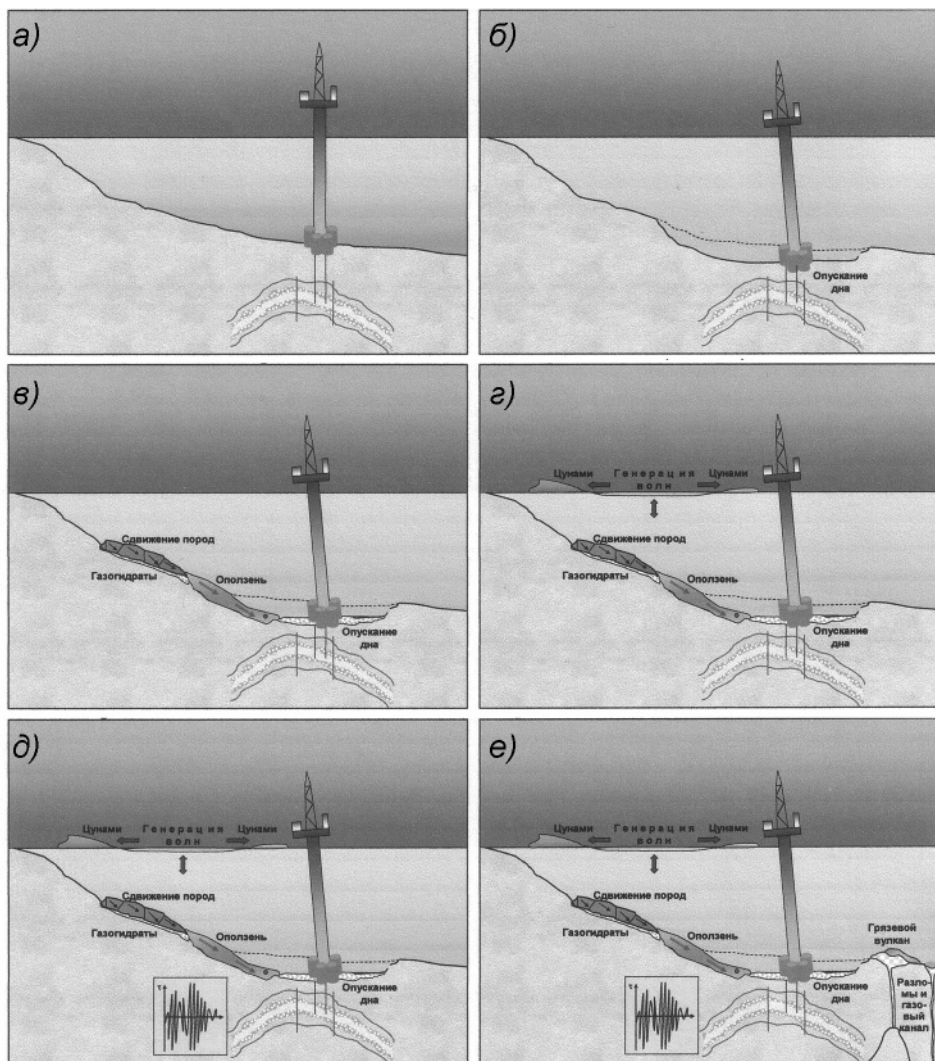


Рис. 3. Модельное отображение геодинамических процессов при обработке морских нефтегазовых месторождений (по материалам совместных семинаров с NGI, а также по (<http://www.ngi.no/en/Geohazards/Content/Shortcuts/Research-and-development/to-be-filled-1/>): *a* — уплотнение коллектора; *б* — проседание дна моря; *в* — оползни, сдвигание пород; *г* — генерация волн (цунами); *д* — землетрясение; *е* — грязевые вулканы и газовые каналы.

2009). Именно недооценка влияния геомеханических процессов приводит к формированию условий возникновения необратимых геодинамических явлений, разрушающих скважины, трубопроводы и добывающие устройства и сооружения.

Достаточно хорошо известным на сегодняшний день обстоятельством является то, что освоение Штокмановского газоконденсатного месторождения требует решения ряда сложных технических задач, среди которых немаловажную роль будет играть вызванное добычей газа техногенное деформирование продуктивных пластов и перекрывающих пород (Мельников, Калашник, 2011; Мельников, Калашник,

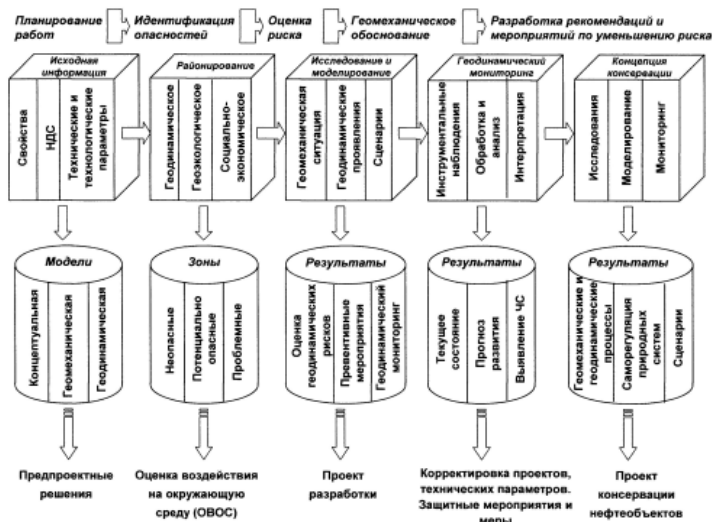


Рис. 4. Концептуальные подходы к обеспечению геодинамической безопасности нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики.

2009; Дмитриевский и др., 2009; Мельников, Калашник, 2010; Калашник, Калашник, 2010; Механика горных пород..., 1994). В частности, на основе выполненного нами математического моделирования установлены закономерности деформирования геологической среды, заключающиеся в объемном уплотнении продуктивного пласта, приводящем к регрессивному прогибу (проседанию) морского дна и значительным субгоризонтальным деформациям и перемещениям придонных слоев грунтов и пород (Мельников, Калашник, 2011; Калашник, Калашник, 2010; Мельников, Калашник, 2010; Дмитриевский и др., 2009). Уплотнение продуктивного пласта (коллектора) будет зависеть от степени и площади снижения внутрипластового давления и может достигнуть 30 %, вследствие чего сформируется регрессивный прогиб (проседание) морского дна и произойдут значительные субгоризонтальные деформации и перемещения придонных слоев грунтов и пород. На основе анализа всех результатов моделирования определено, что для условий ориентировочно десятилетней отработки Штокмановского газоконденсатного месторождения максимальная величина проседания морского дна может составить 3–5 м.

Столь существенные проседания перекрывающего массива пород и субгоризонтальные перемещения придонных пород не могут не привести к развитию опасных геодинамических процессов, в результате которых возможны потеря устойчивости, нарушения прочности и разрушения основных конструкций и объектов добычи и транспортирования газа и конденсата. В итоге может возникнуть чрезвычайная ситуация и даже авария (Мельников, Калашник, 2009; Калашник, Калашник, 2013; Механика горных пород..., 1994; Дмитриевский и др., 2009).

Выполненный авторами анализ федеральных законов (ФЗ «О недрах» № 65-ФЗ от 06.06.2003 г., ФЗ «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ от 10.01.2002 г. ст. 1, ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» №68-ФЗ от 21.12.1994 г., ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» №116-ФЗ от 21.07.1997 г.), нормативно правовых и ме-

тодических документов (СНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения», СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения», СНиП 22-01-95 «Геофизика опасных природных воздействий», СНиП 2.01.09-91 «Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах», ГОСТ Р 22.1.01-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения», ГОСТ Р 22.1.06-99 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов», РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ», РД 39-117-91 «Инструкция по маркшейдерским и топографо-геодезическим работам в нефтяной и газовой промышленности», РД 07-113-96 «Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок», РД 07-408-01 «Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр», ВРД 39-1.13-081-2003 «Система производственного экологического мониторинга на объектах газовой промышленности. Правила проектирования», «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» (ПБ 08-624-03), «Правила охраны недр» (ПБ 07-601-03), «Положение о порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр», Приказ МПР России № 433 от 21.05.2001, «Положение об организации и осуществлении государственного мониторинга окружающей среды (государственного экологического мониторинга)», утв. постановлением Правительства РФ №177 от 31.03.2003, «Положение о функциональной подсистеме мониторинга состояния недр (Роснедра) единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций», утв. приказом ведомства № 1197 от 24.11.2005 г., «Временное положение о горно-экологическом мониторинге» 1997 г., «Руководство по геодинамическим наблюдениям и исследованиям для объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК)» 1997) и ряда соответствующих публикаций показал, что обеспечение геодинамической безопасности нефтегазообъектов в российском секторе Западной Арктики требует проведения специальных исследований и научно-технической проработки.

По мнению авторов, основная идея концептуальных подходов к обеспечению геодинамической безопасности нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики должна заключаться в том, что для каждого этапа жизненного цикла нефтегазообъекта должны выполняться соответствующие специальные геомеханические и геодинамические исследования, в результате которых должны разрабатываться и реализовываться превентивные геобезопасные мероприятия по алгоритму «планирование работ — идентификация опасностей — оценка риска — геомеханическое обоснование — разработка рекомендаций и мероприятий по уменьшению риска» (рис. 4). Обязательным условием обеспечения геодинамической безопасности должен являться геодинамический мониторинг, проведение которого позволит выявить на ранней стадии развитие опасных деформационных процессов и своевременно принять управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации.

В целях решения задач геодинамической безопасности нефтегазовых объектов в западном секторе Российской Арктики авторами разработана системная структура геодинамического мониторинга добычи, хранения и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья, учитывающая тектонофизические особенности

региона и включающая комплексы натуральных измерений потенциально-опасных зон соответствующими методами контроля, прогнозных расчетов, экспертных оценок природных и техногенных воздействий на нефтегазообъекты в целях прогнозирования и обнаружения на ранних стадиях признаков возникновения опасных деформационных процессов для принятия управляющих решений и превентивных мероприятий (Козырев и др., 2011). Организационную и техническую основу геодинамического мониторинга должны составить имеющиеся станции и полигоны наблюдений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения геодинамической безопасности работ и устойчивости конструкций и нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья необходимо проведение специальных геомеханических исследований, включающих в себя: оценку геодинамического режима региона добычи и хранения нефтеуглеводородов, 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.

*Исследования выполнены по Программе Отделения наук о Земле РАН ОНЗ-1 «Геологическое строение и нефтегазоносность Арктики (территории и акватории)».*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б.* Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
- Годзиковская А.А., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А.* Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке / Отв. ред. А.Н. Виноградов. М.: Ваш полиграфический партнер, 2010. 130 с.
- Дмитриевский А.Н., Кульпин Л.Г., Максимов В.М.* Проблемы освоения природно-техногенных объектов морской добычи углеводородов в Арктике // Мурманшельфинфо. 2009. № 1(6). С. 11–16.
- Кайзер М.Дж., Пулцифер А.Г.* Риски и потери при морской добыче // Oil & Gas Journal. 2007. № 6. С. 96–105.
- Калашиник А.И.* Научно-технические основы геодинамической безопасности освоения углеводородных ресурсов западного сектора Российской Арктики // Записки Горного института. 2013. Т. 201. С. 261–268.
- Калашиник А.И.* Геомеханическое обеспечение безопасности нефтегазовых объектов в районе Баренцева моря // RAO/CIS Offshore 2013: Тр. 11-й Междунар. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ 10–13 сентября 2013 г. Санкт-Петербург. СПб.: Химиздат, 2013. С. 304–306.
- Калашиник А.И., Борисов А.В., Калашиник Н.А.* Анализ данных кавернометрии и осложнений при строительстве разведочных скважин на Штокмановском газоконденсатном месторождении // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 7. С. 23–26.



- Калашиник А.И., Калашиник Н.А.* Техногенное деформирование недр при разработке Штокмановского газоконденсатного месторождения // Рациональное освоение недр. 2010. № 2. С. 56–61.
- Калашиник А.И., Калашиник Н.А.* Социально-экономические последствия чрезвычайных ситуаций и аварий при нефтегазодобыче на шельфе // Записки Горного института. 2013. Т. 201. С. 34–39.
- Каминский В.Д., Андреев С.И., Смирнов А.Н., Супруненко О.И., Козлов С.А.* Перспективы развития МСБ России на континентальном шельфе и в Международном районе Мирового океана // Разведка и охрана недр. 2012. № 9. С. 98–104.
- Козырев А.А., Калашиник А.И., Каспарьян Э.В., Савченко С.Н.* Концепция организации геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики // Вестник МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. университета. 2011. Т. 14. № 3. С. 587–600.
- Мельников Н.Н., Калашиник А.И.* Геодинамические аспекты освоения шельфовых нефтегазовых месторождений (на примере Баренцрегиона) // Геоэкология. 2010. №4. С. 291–301.
- Мельников Н.Н., Калашиник А.И.* Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. 140 с.
- Мельников Н.Н., Калашиник А.И.* Шельфовые нефтегазовые разработки западного сектора российской Арктики: геодинамические риски и безопасность // Газовая промышленность. 2011. Спецвыпуск 661. С. 46–53.
- Мельников Н.Н., Калашиник А.И., Савченко С.Н., Калашиник Н.А.* Научно-технические аспекты геодинамической безопасности нефтегазообъектов западного сектора Российской Арктики // Горный журнал. 2010. № 9. С. 51–54.
- Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: Сб. науч. тр. / Под ред. В. Мори и Д. Фурментро. М.: Мир, 1994. 416 с.
- Разбор полетов по «возможно худшей» нефтяной катастрофе в истории США // Oil&Gas Journal. 2010. № 11. С. 24–28.
- Супруненко О.И., Сулова В.В.* Западно-Арктическая нефтегазоносная провинция: ресурсная база углеводородного сырья, состояние и перспективы недропользования // Горный журнал. 2012. № 3. С. 66–71.
- Offshore Geohazards. URL: <http://www.ngi.no/en/Geohazards/Content/Shortcuts/Research-and-development/to-be-filled-1/> [дата обращения 03.04.2014]