УДК 622.276:681.5

А.И.КАЛАШНИК, *канд. техн. наук*, *зав. лабораторией*, *kalashnik@goi.kolasc.net.ru*
Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, *Апатиты*

A.I.KALASHNIK, *Dr. in eng. sc.*, *kalashnik@goi.kolasc.net.ru*
Mining Institute of the Kola centre of science of the Russian Academy of Sciences, *Apatity*

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОСВОЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РЕСУРСОВ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Разработана концепция фундаментальных исследований геодинамической безопасности нефтегазообъектов, согласно которой нефтегазовый объект с вмещающей его геологической средой рассматривается как сложная открытая природно-техническая система, геомеханическая эволюция которой осуществляется цикличным чередованием стадий линейного и нелинейного деформирования с вероятностью скачкообразного перехода или бифуркаций. Предложены методические подходы к анализу и оценке геодинамических рисков. Для западного сектора российской Арктики разработана системная структура геодинамического мониторинга добычи, хранения и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья, учитывающая тектонофизические особенности региона и включающая комплексы натурных измерений, моделирования и экспертных оценок.

Ключевые слова: углеводородное сырье, Арктика, геодинамика, мониторинг, безопасность.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASES OF GEODYNAMIC SAFETY OF DEVELOPMENT OF HYDROCARBONIC RESOURCES OF THE WESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

The concept of basic researches of geodynamic safety oil and gas objects, consisting that the oil and gas object with the geological environment containing it is considered as the difficult open prirodno-technical system which geomechanical evolution is carried out by cyclic alternation of stages of linear and nonlinear deformation, with probability of spasmodic transition or bifurcation is developed. Methodical approaches to the analysis and an estimation of geodynamic risks are offered. The system structure of geodynamic monitoring of extraction, storage and pipeline transportation of the hydrocarbonic raw materials is developed for the western sector of the Russian Arctic, considering tectonofizical features of region and including complexes of natural measurements, modelling and expert estimations.

Key words: hydrocarbonic raw materials, Arctic regions, geodynamics, monitoring, safety.

Западный сектор российской Арктики в ближайшей перспективе будет являться крупным стратегическим центром добычи и транспортирования нефтеуглеводородов: вводится в эксплуатацию Приразломное нефтяное месторождение, принимаются инвестиционные решения и проводятся предпроектные изыскания для реализации Штокмановского проекта. Но кроме сложных арктических условий, при обустройстве месторождений и при добыче и транспортировании нефтеуглеводородов, следует учитывать природно-техногенные геодинамические проблемы как [9, 10].

Северо-восточная часть Балтийского щита, куда входит и Кольский полуостров, является геодинамически активной: здесь инструментально зафиксированы современ-

ные интенсивные (до 10 мм в год) поднятия земной коры, четко выделяются сейсмически активные Мурманская и Беломорская сейсмогенные зоны, в пределах которых происходят землетрясения магнитудой 3-4 балла. Непосредственно в районе планируемого строительства завода по сжижению природного газа в пос. Териберка в начале XX в. произошло землетрясение силой около 7 баллов по шкале Рихтера. В центральной части Кольского полуострова вследствие крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерских месторождениях произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 5 баллов, приведшие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций [12]. Более того, по площади область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район непосредственного ведения горных работ.

О необходимости обеспечения геодинамической безопасности шельфовых нефтегазообъектов однозначно говорит мировой опыт добычи и трубопроводного транспортирования нефтеуглеводородов, особенно широко известная экологическая катастрофа в Мексиканском заливе – авария и разрушение платформы Deepwater Horizon. Безусловным подтверждением необходимости обеспечения геодинамической безопасности являются также последствия разрушающих и катастрофических землетрясений, связанных с разработкой нефтегазовых месторождений (Нефтегорское, Газлийское, Лакское и др.), а также крупномасштабных просадок земной поверхности и морского дна (Уилмингтон, Лонг-Бич, Экофиск и др) [1, 5, 9].

В общем случае риск геодинамического проявления, или геодинамический риск, представляет собой количественную меру оценки опасности, интегрирующую суммарную вероятность возникновения тех или иных чрезвычайных ситуаций с учетом суммарного социально-экономического и экологического ущерба. Величину риска можно определить на основе выражения [10]

$$R = \sum_0^1 P_i \sum_0^N Y ,$$

где P – вероятность возникновения чрезвычайной ситуации; Y – возможный социально-экономический и экологический ущерб.

В целях оценки и анализа геодинамических рисков целесообразно применять методы качественного и количественного анализа [7]. Так как методы количественного анализа риска логически более структурированы и имеют математическую основу, их применение позволит, наряду с выявлением опасностей, получить количественные (численные) оценки, следующих параметров:

• вероятностей (частот) опасных ситуаций, процессов и событий (с использованием методов статистики при обработке имеющихся данных или построением деревьев событий);

• социально-экономического и экологического ущерба (на основе применения соответствующего метода оценки);

• собственно величину природно-техногенного геодинамического риска как интегральной меры опасности, являющейся функцией вероятности реализации нежелательных событий и их последствий или ущерба.

Для управления геодинамическими рисками могут быть использованы известные принципы: нормированности (принцип приемлемого риска), целесообразности (из соотношения затраты – выгоды), и сбалансированности (оптимальное использование доступных ресурсов).

Основная идея концептуальных подходов к обеспечению геодинамической безопасности заключается в том, что для каждого этапа жизненного цикла нефтегазообъекта должны выполняться соответствующие специальные геомеханические и геодинамические исследования, в результате которых могут разрабатываться и реализовываться превентивные геобезопасные мероприятия по алгоритму планирование работ – идентификация опасностей – оценка риска – разработка рекомендаций и мероприятий по уменьшению риска (рис.1).

Обустройство и вовлечение в эксплуатацию нефтегазовых месторождений Баренцева, Печорского и Карского морей без уче-

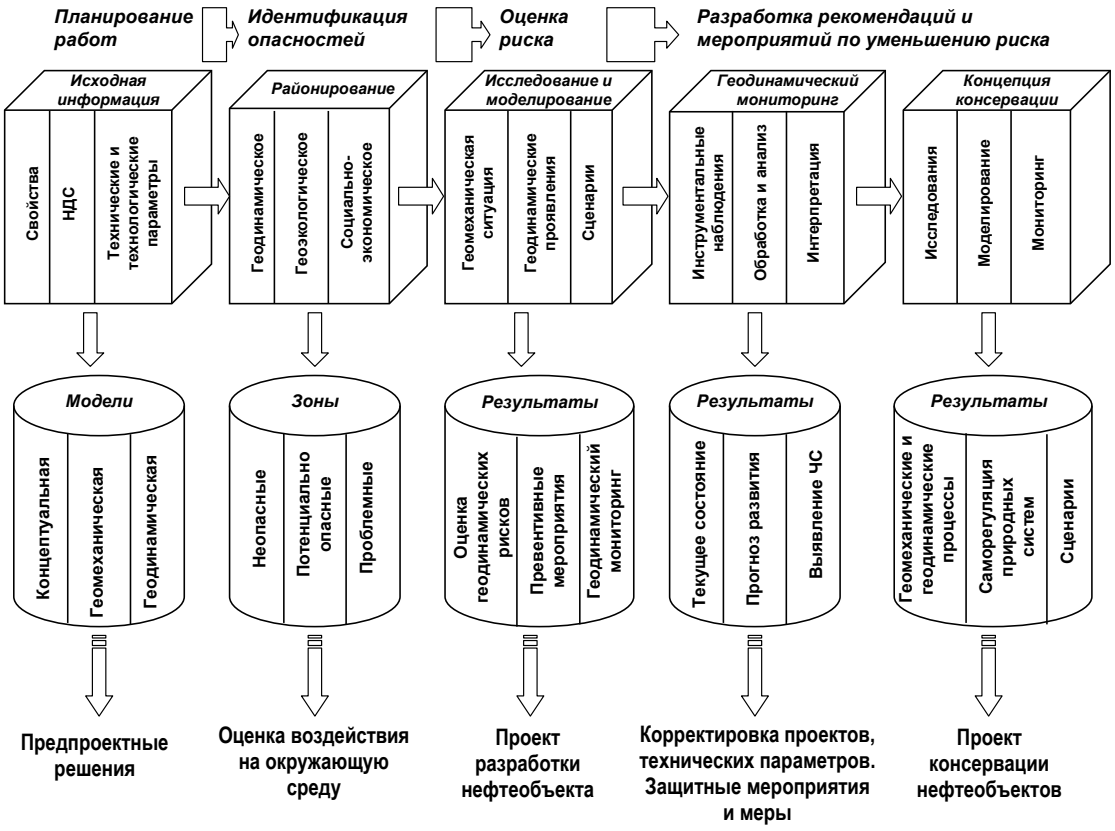


Рис.1. Блок-схема концептуальных подходов к обеспечению геодинамической безопасности добычи и транспортирования нефтеуглеводородов в западном секторе российской Арктики

та геомеханических процессов может привести к формированию условий возникновения и реализации разрушающих геодинамических явлений [10]: проседаний, оползней, землетрясений – и, как следствие, к социально-экономическому и экологическому ущербу, потерям и недоиспользованию запасов нефтеуглеводородов. Анализ влияния различных факторов на возникновение аварийных ситуаций на морских нефтегазоразработках в Европе показывает, что наибольшее число аварий произошло за счет потери устойчивости, повреждений и разрушений конструкций (36 %), тяжелых погодных условий (7 %), удара (5 %). Следует обратить внимание и на анализ первопричин, потому что по 22 % аварийных ситуаций причины неизвестны [3].

Общеизвестен факт оседания дневной поверхности (а для морских нефтегазоразработок морского дна) вследствие добычи нефти и газа. Автором собраны, систематизированы и проанализированы опубликованные данные по инструментально зафиксированным оседаниям более чем на 130 разрабатываемых нефтегазовых месторождениях [9, 10]. Выявлены проседания 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 сдвижения с горизонтальными перемещениями и оползнями пород к ее центральной части, образованием субвертикальных трещин, уступов и террас, в отдельных случаях достигающих 2-2,5 м [1, 4, 5, 9].

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 около 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. 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 долларов.

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 долларов [1].

Очень важным, а порой и определяющим, геодинамическим фактором на объектах нефтегазоразработок является наведенная сейсмичность. Макропроявления сейсмичности в виде техногенных и индуцированных землетрясений относительно редки, но их разрушающее влияние, а также социально-экономический и экологический ущерб очень велики. Автором собрана и проанализирована информация по техногенным землетрясениям на эксплуатируемых нефтегазовых месторождениях, а также по землетрясениям, индуцированным добычей нефти и газа [1, 5, 9, 10, 12]. Выявлено, что землетрясения с магнитудой от 3 до 7 баллов и более происходят и на газовых, и на нефтяных месторождениях и могут приводить к катастрофическим разрушениям.

Конечно, на формирование этих опасных геодинамических процессов, сопровождающихся проседаниями и смещениями пород, землетрясениями, а также вызванными ими оползнями, выбросами, образованиями пустот, газовых каналов, грязевых вулканов и пр., влияет большое количество факторов и условий, но в основе этих явлений лежат геомеханические процессы. Именно недооценка влияния геомеханических процессов приводит к возникновению необратимых геодинамических явлений, разрушающих скважины, трубопроводы и добывающие устройства и сооружения [1, 5, 9, 10, 12].

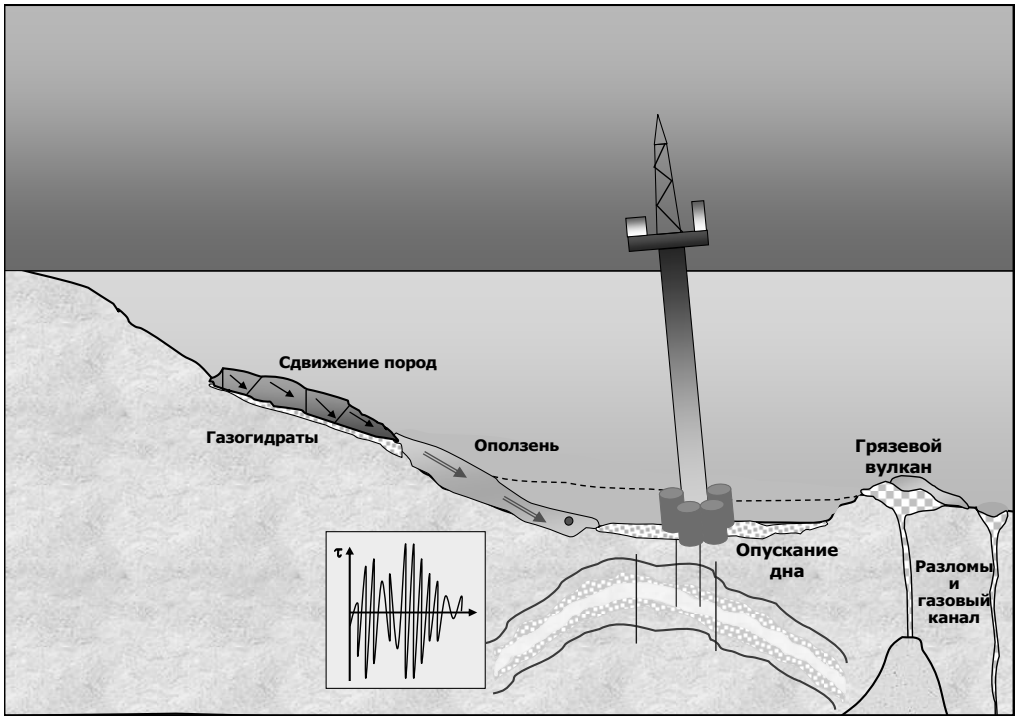


Рис.2. Модельное отображение техногенных геодинамических процессов при отработке морских нефтегазовых месторождений

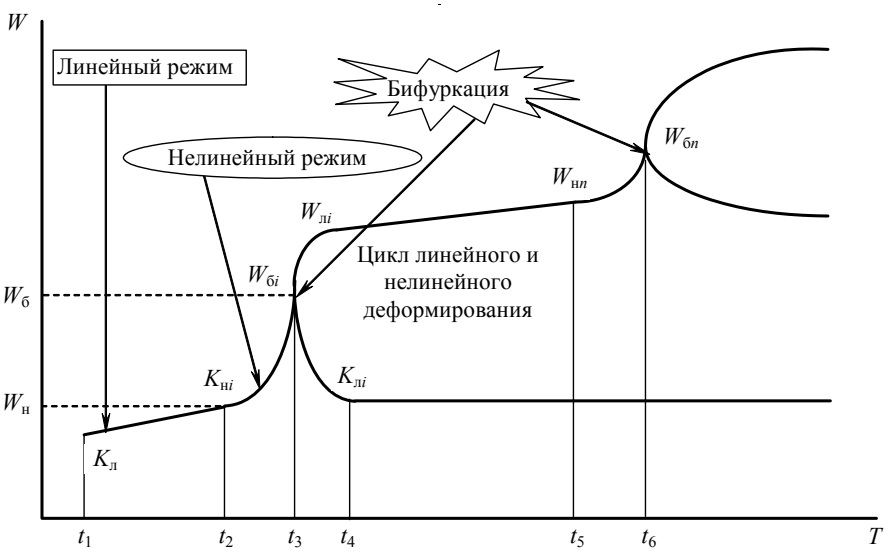


Рис.3. Концептуальная модель геомеханической эволюции НГ ПТС

На наш взгляд, концепция фундаментальных исследований геодинамической безопасности должна заключаться в следующем: нефтегазодобывающий комплекс с вмещающим его участком геологической среды следует рассматривать как сложную открытую нефтегазовую природно-техническую систему (НГ ПТС), геомеханическая эволюция которой осуществляется по известному алгоритму [9] с чередованием стадий линейного и нелинейного деформирования, с вероятностью скачкообразного перехода или бифуркаций. Необходимо подчеркнуть, что речь 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 (рис.3). При этом основным управляющим параметром, в соответствии с подходами Ф.А.Летникова [8], принята энергия *W*.

На начальном этапе (t_1-t_2) эволюция НГ ПТС идет 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 заданных 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 [9, 11, 12].

Когда управляющий параметр *W* достигает предельных значений $W_н$ (точка $K_{нi}$ на рис. 3), 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 $K_{бi}$). Термин бифуркация иногда заменяют терми-

ном 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 $K_{бi}$ –$K_{лi}$), или аккумуляция энергии (восходящая ветвь $K_{Бi}$ –$K_{Лi}$). Затем при притоке новой порции энергии цикл повторяется (интервал t_4-t_6) и т.д.

Хорошо известно, что освоение Штокмановского газоконденсатного месторождения требует решения ряда сложных технических задач, среди которых немаловажную роль будет играть вызванное откачкой газа техногенное деформирование продуктивных пластов и перекрывающих пород [2, 9]. В частности, на основе математического моделирования установлены закономерности деформирования геологической среды, заключающиеся в объемном уплотнении продуктивного пласта (коллектора), которое зависит от степени и площади снижения внутрипластового давления и может достигать 30 %, вследствие чего формируется регрессивный прогиб (проседание) морского дна, значительные субгоризонтальные деформации и перемещения придонных слоев грунтов и пород [10]. По результатам моделирования определено, что для условий ориентировочно десятилетней отработки Штокмановского газоконденсатного месторождения максимальная величина проседания морского дна может составить 3-5 м.

Столь существенные проседания массива пород не могут не способствовать развитию опасных геодинамических процессов, потере устойчивости, нарушениям прочности и разрушению основных конструкций и объектов добычи и транспортирования газа и конденсата, которые могут привести к чрезвычайной ситуации и даже аварии.

Для решения задач геодинамической безопасности нефтегазообъектов в западном секторе российской Арктики разработана системная структура геодинамического мониторинга добычи, хранения и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья, учитывающая тектонофизические особенности региона и включающая комплексы натурных измерений потенциально опасных зон соответствующими методами контроля, прогнозные расчеты, экспертные оценки 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 [9]. Организационную и техническую основу геодинамического мониторинга должны составить имеющиеся станции и полигоны наблюдений [6].

Таким образом, для обеспечения геодинамической безопасности работ и устойчивости конструкций и нефтегазовых объектов западного сектора российской Арктики и трубопроводного транспортирования углеводородного сырья необходимы специальные геомеханические исследования:

• оценка геодинамического режима региона добычи и хранения нефтеуглеводородов, а также трасс трубопроводов;

• оценка исходного напряженно-деформированного состояния пород коллектора и вмещающего массива;

• тенденции и механизмы (модели) деформирования их вследствие добычи нефти и газа;

• оценка геодинамических рисков;

• обоснование геобезопасного расположения нефтегазообъектов и разработка превентивных геобезопасных мероприятий по обеспечению безопасности добычных и транспортных работ и устойчивости основных конструкций и сооружений;

• геодинамический мониторинг добычи и транспортирования углеводородного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адушкин В.В.* Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы) / В.В.Адушкин, С.Б.Турунтаев. М., 2005. 252 с.

2. *Дмитриевский А.Н.* Проблемы освоения природно-техногенных объектов морской добычи углеводородов в Арктике / А.Н.Дмитриевский, Л.Г.Кульпин, В.М.Максимов // МурманшельфИнфо. 2009. № 1(6). С.11-16.

3. *Калашник Н.А.* Экономический ущерб от чрезвычайных ситуаций и аварий на морских нефтегазоразработках: анализ и подходы к оценке // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2011. № 6. С.15-19.

4. *Касьянова Н.А.* Экологические риски и геодинамика. М., 2003. 332 с.

5. *Кашников Ю.А.* Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А.Кашников, С.Г.Ашихмин. М., 2007. 467 с.

6. *Козырев А.А.* Концепция организации геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики / А.А.Козырев, А.И.Калашник, Э.В.Каспарьян, С.Н.Савченко // Вестник МГТУ. 2011. Т.14. № 3. С.587-600.

7. *Лесных В.В.* Оценка показателей промышленной безопасности производственных объектов газовой отрасли методами риск-анализа / В.В.Лесных, С.В.Овчаров // Наука и техника в газовой промышленности. 2010. № 2 (42). С.62-71.

8. *Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. Планета Земля // Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика». СПб, 2004. С.134-139.

9. *Мельников Н.Н.* Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты / Н.Н.Мельников, А.И.Калашник. Апатиты, 2009. 140 с.

10. *Мельников Н.Н.* Шельфовые нефтегазовые разработки западного сектора российской Арктики: геодинамические риски и безопасность / Н.Н.Мельников, А.И.Калашник // Газовая промышленность, 2011. С. 46-53.

11. *Мирзаджанзаде А.Х.* Физика нефтяного и газового пласта / А.Х.Мирзаджанзаде, И.М.Ахметов, А.Г.Ковалев. Москва – Ижевск, 2005. 280 с.

12. Сейсмичность при горных работах / Под ред. Н.Н.Мельникова. Апатиты, 2002. 325 с.

REFERENCE

1. *Adushkin V.V.*, *Turuntaev S.B.* Technogenic processes in Earth crust (hazards and catastrophes).Moscow, 2005. 252 p.

2. *Dmitrievskij A.N.*, *Kulpin L.G.*, *Maximov V.M.* Development Challenges of natural-technogenic facilities of hydrocarbon sea production in the Arctic. MurmanshelfInfo. 2009. № 1 (6). P.11-16.

3. *Kalashnik N.A.* Economic a damage from extreme situations and failures on sea oil and gas industry: the analysis and approaches to an estimation // Economy and management Problems an oil and gas complex. 2011. N 6. P.15-19.

4. *Kasyanova N.A.* Ecological risks and geodynamics. Moscow, 2003. 332 p.

5. *Kashnikov Yu.A.*, *Ashihmin S.G.* Rock mechanics in hydrocarbon deposit development. Moscow, 2007. 467 p.

6. *Kozyrev A.A.*, *Kalashnik A.I.*, *Kasparjan E.V.*, *Savchenko S.N.* Concept of the organisation of geodynamic monitoring of oil and gas objects of the western sector of the Russian Arctic // MGTU Bulletin. 2011.Vol.14. N 3. P.587-600.

7. *Lesnyh V.V.*, *Ovcharov S.V.* Estimation of indicators of industrial safety of industrial objects of gas branch risk-analysis methods // The Science and technics in the gas industry. 2010. N 2 (42). P.62-71.

8. *Letnikov F.A.* Geological systems synergetics. Earth planet // Encyclopedic reference book. Volume «Tectonics and geodynamics». Saint Petersburg, 2004. P.134-139.

9. *Melnikov N.N.*, *Kalashnik A.I.* Offshore oil-and-gas development: geomechanical aspects. Apatity, 2009, 140 p.

10. *Melnikov N.N.*, *Kalashnik A.I.* Shelf oil and gas workings out of the western sector of the Russian Arctic: geodynamic risks and safety // The gas industry. 2011. P.46-53.

11. *Mirzadzhanzade A.H.*, *Ametov I.M.*, *Kovalev A.G.* Physics of oil and gas formations. Moscow-Izhevsk, 2005. 280 p.

12. Seismicity at mining / Under the editorship of. N.N.Melnikov. Apatity, 2002. 325 p.