

## **Экологическая и промышленная безопасность при освоении нефтегазовых ресурсов Арктики**

Дмитриевский А.Н., Максимов В.М., Никонов А.И., Корниенко С.Г.  
*Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия*  
[A.Dmitrievsky@ipng.ru](mailto:A.Dmitrievsky@ipng.ru)

Наметившаяся в последние годы устойчивая тенденция падения уровней добычи нефти и газа в традиционных районах мира на суше привлекла пристальное внимание к перспективам промышленного освоения месторождений континентального шельфа. В ближайшие годы предстоит освоение уникальных месторождений углеводородов на арктическом шельфе России.

Спецификой освоения месторождений в условиях арктического шельфа являются проблемы безопасности их эксплуатации в качестве природно-техногенных морских объектов. Мировой опыт разведочных и эксплуатационных работ по освоению ряда нефтегазоносных месторождений Северного моря, арктического шельфа Канады и Аляски свидетельствует о различных, иногда неожиданных и непредвиденных трудностях, которые могут возникнуть в ходе проведения этих работ. Попытки приступить к строительству нефтегазопромысловых сооружений без предварительного изучения и детальной оценки инженерно-геологических условий, без необходимой организационной, методической и технической подготовки приводили к серьезным авариям и неполадкам, неудачам, дополнительным затратам средств и времени.

### **1. Экологическая и промышленная безопасность природно-техногенных морских объектов при освоении шельфа Арктики [1, 2, 3, 4, 5]**

Наряду с известными трудными природными условиями морской добычи углеводородов дополнительные осложнения вносят техногенные явления. Рассмотрим некоторые возможные проявления техногенности.

В последние годы все больше внимания уделяется последствиям разработки нефтегазовых месторождений. Этому способствует значительный накопленный опыт разработки месторождений углеводородов, повышающиеся требования к охране недр и окружающей среды, особенно при разработке месторождений с агрессивными компонентами в составе пластовых флюидов, а также имеющиеся негативные последствия применяемых подходов к разработке нефтегазовых месторождений. Ярким примером техногенности является осадка земной поверхности над разрабатываемыми месторождениями, сопровождаемая иногда техногенными землетрясениями.

Оценка величин осадки поверхности дна моря особенно актуальна, поскольку для морских месторождений предъявляются более жесткие требования к охране недр, к надежности работы скважин, а также к морским платформам и подводным модулям.

Для оценки возможных деформационных процессов, в виде оседания дна моря, были выбраны Штокмановское газоконденсатное, Мурманское газовое, Лудловское и Ледовое газоконденсатные месторождения Баренцева моря.

Анализ природно-техногенных деформационных процессов в многолетнемерзлых породах шельфа Арктики показал, что в зависимости от глубины залегания, физико-механических свойств грунтов, их минерального состава и сроков эксплуатации месторождений, величина просадки может составлять: для Штокмановского ГКМ – 1,75 м., для Ледового ГКМ – 3,9 м., Лудловского ГКМ – 3,4 м., Мурманского ГМ – 4,9 м.

Разработка нефтяных и газовых месторождений шельфа Арктики и связанные с ними изменение пластового давления, различные виды воздействия на залежь для повышения нефтеотдачи нарушают природное равновесное состояние недр, создавая предпосылки для возникновения деформаций горного массива и

поверхности дна моря. Наблюдающиеся при этом просадки могут составлять от нескольких миллиметров до нескольких метров. Основные и наиболее опасные формы этих последствий: разгерметизация заколонных пространств скважин, деформация подводных коммуникаций, возможный выход из строя крепящих якорей добычной платформы, а так же при использовании стационарных платформ с опорой на дно моря уменьшение клиренса платформ до уровня досягаемости волн. При снижении пластового давления и деформации продуктивного пласта возмущение передается по массиву вышележащих горных пород до поверхности земли, поэтому просадка может быть неравномерной, что целесообразно учитывать в расчетах при освоении месторождений.

Особенностями при освоении арктических месторождений является суровый климат, обширные ледовые условия, глубокое промерзание пород, наличие субмаринной криолитозоны и сопутствующие гидратные скопления.

Анализ термобарических условий дна и недр, данных о температуре воды у дна моря показал наличие зоны стабильности газогидратов. В частности для Штокмановского ГКМ эта зона находится на глубине 200-250 м под дном моря. В процессе разработки месторождения при извлечении теплого газа из нижележащих горизонтов происходит увеличение температуры пород, окружающих эксплуатационную колонну. Это приводит к разложению газогидратов с выделением больших объемов свободного газа. Например, в течение первого года разработки Штокмановского ГКМ может выделиться 150-180 м<sup>3</sup> свободного газа на 1 м<sup>3</sup> гидратосодержащих пород. Более того при остановке скважины по тем или иным причинам происходит обратный процесс - промерзание породы. Рассмотренные процессы могут привести к серьезным последствиям, связанным с грифонообразованием у устья скважин, увеличением риска пожароопасности при выбросе газа в атмосферу, опасности для платформ и судоходства.

К числу аварий, имеющих наиболее опасные последствия, относится полный или частичный разрыв подводных газопроводов высокого давления.

При полном или частичном разрыве подводного газопровода образуется газовая струя, поведение которой зависит от ее мощности и глубины воды над ним. Во всех случаях истечения турбулентная струя содержит смесь пузырей газа и капель воды. Первоначальное направление струи газа может быть различным - от вертикального до горизонтального. При небольших глубинах над водной поверхностью возникает газоводяной фонтан, а если повреждение происходит на большой глубине, то образуется волна газоводяной смеси; над поверхностью возникает газовое облако. Оценка площади возникающей волны или фонтана на поверхности воды дает представление о размерах первоначального пятна загрязнения. Последствия аварий на подводных газопроводах оцениваются на основе расчетов динамики выброса газа и моделирования движения газожидкостной струи в воде.

Для расчета параметров истекающего газа при полном разрыве трубопровода используется численное решение нестационарных уравнений газовой динамики с соответствующими начальными и граничными условиями. При частичном разрыве газопровода мощность газожидкостной струи меньше, но длительность выброса гораздо больше, поскольку он не сразу может быть обнаружен (если краны-отсекатели не срабатывают автоматически). Результаты расчетов параметров газа на срезе отверстия необходимы для определения параметров газоводяной струи на поверхности воды.

Начальные и граничные условия, а также параметры математических моделей определяются сценарием гипотетической аварии. В данном случае это характеристики

газопровода и принципы работы кранов-отсекателей, место аварии (глубина водоема), размеры отверстия, ориентация струи вблизи отверстия, загрязненность воды на различных глубинах. Анализ результатов расчетов позволяет выявить наиболее опасные с той или иной точки зрения сценарии.

Оценки высоты волны или фонтана над поверхностью воды и диаметра источника загрязнения основаны на данных, полученных в лабораторных экспериментах и пересчитанных с помощью гидродинамической теории подобия. В них использованы выходные данные расчетов выброса газа из трубопровода при полном или частичном разрыве. Возможные последствия разрыва оценены с помощью результатов расчета истечения струи в вертикальном или горизонтальном направлении. При этом для расчетов параметров газожидкостной струи при выбросе на различных глубинах использованы разные модели.

Предложенный комплекс газодинамических и полуэмпирических моделей позволяет определить зоны потенциальной опасности при возможных авариях на различных участках подводного газопровода; участки газопровода, где газ не выйдет на поверхность водоема из-за высокого противодавления, но возможно интенсивное затекание воды в трубу; характерные размеры области выхода газа при авариях на различных глубинах и концентрацию газа и других ЗВ в источнике загрязнения.

Во время выброса и после его прекращения происходит дальнейшее рассеяние ЗВ (в виде растворенных или взвешенных примесей) в приповерхностном слое воды, дегазация газовой смеси и последующее рассеяние газа в атмосфере. Эти процессы связаны с собственной турбулентностью моря (водоема) и атмосферы.

Предложенные модели дают исходную информацию для оценки экологического риска, связанного с возможностью воспламенения или взрыва газа над поверхностью водоема, определения размеров зон с опасной концентрацией природного газа, а также области газожидкостной смеси с пониженной плотностью на поверхности водоема, опасных для судоходства.

Учитывая значительные материальные затраты на ликвидацию или возмещение этих негативных последствий, некоторые из которых носят необратимый характер, исследование техногенных процессов, происходящих при разработке нефтегазовых месторождений, имеет весьма актуальное значение. Умение предсказывать ход их развития позволит еще на стадии проектирования разработки месторождений вносить необходимые коррективы в проектные показатели.

## **2. Научные основы методов оценки и прогнозирования развития опасных процессов взаимодействия природной среды и объектов нефтегазовой инфраструктуры в арктической зоне Российской Федерации на основе данных аэрокосмического и наземного мониторинга [6]**

Актуальной проблемой является разработка технологии оценки и прогнозирования участков вероятного развития опасных геокриологических процессов (ОГП, термокарст, термоэрозия, подтопление, заболачивание, морозное пучение и др.), обусловленных изменением влажности грунтов и условий поверхностного стока в районах строительства объектов нефтегазового комплекса в Арктической зоне с использованием данных аэрокосмических и наземных наблюдений. Актуальность исследований обусловлена необходимостью создания нормативно-методической базы для проведения системных мониторинговых работ на основе обновляемых данных космической съемки высокого и сверхвысокого (субметрового) пространственного разрешения, обеспечивающих тематическое картографирование в масштабе 1:5 000 – 1:10 000.

Определение информативных спектральных каналов, спектральных индексов и алгоритмов обработки спутниковых данных проводилось на примере территории строительства завода по сжижению природного газа и объектов инфраструктуры на

Южно-Тамбейском газоконденсатном месторождении в районе пос. Сабетта (восточный берег полуострова Ямал). В работах использовались панхроматические и многоспектральные космические снимки (КС) со спутников QuickBird (съемка 6 июля 2003 г.) и Ikonos (съемка 19 июля 2013 г.), позволяющие характеризовать изменение ландшафта и гидрологических условий до и после строительства объектов. Для анализа использовались рассчитанные по КС альбедо поверхности, карты с классификацией типов поверхности, а также различные спектральные индексы, позволяющие с высокой детальностью (0,8 м) характеризовать неоднородность растительности и влажности почвенно-растительного покрова (ПРС), связанную с неоднородностью влажности грунтов. Для верификации результатов обработки КС использовались материалы полевой геокриологической съемки 2012 г. и данные воздушной инфракрасной (ИК) тепловой съемки 2013 г. (детальность 0,3 м). Впервые показано, что районирование влажности грунтов при наличии сплошного растительного покрова может быть проведено при комбинировании спектральных каналов КС сверхвысокого пространственного разрешения в видимом и ближнем ИК диапазоне. Данный факт свидетельствует о возможности организации в рамках геотехнического мониторинга систематических наблюдений и крупномасштабного картографирования вариаций влажности грунтов на участках строительства и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса, включая промысловые и магистральные трубопроводы с использованием КС сверхвысокого пространственного разрешения.

На основе КС 2003 и 2013 гг. и системы установленных информативных параметров для района взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта пос. Сабетта была построена карта изменения площади водоемов и влажности почвенно-растительного слоя (ПРС) в масштабе 1:5 000. Карта характеризует участки исчезновения и образования новых водоемов, подтоплений, повышения влажности и дренирования ПРС, а также направления естественного поверхностного стока воды в районе ВПП, преобладавшие до начала ее строительства. Участки образования новых водоемов и увеличения влажности ПРС, в основном, сосредоточены по периметру ВПП и примыкающей к ней дороги, несмотря на то, что строительство велось на территории с углами уклона менее 2°. Сама по себе приуроченность зон повышения влажности ПРС к ВПП и ведущей к ней дороги свидетельствует о неслучайном характере распределения параметров и, в целом, о достоверности полученного результата.

Следует отметить, что данная территория характеризуется высокой степенью обводнения, и любое строительство с песчаной отсыпкой под основания может сопровождаться скоплениями влаги в почве и оттаявшем грунте. Поскольку основное строительство ВПП было начато в 2012 году, а повторная космическая съемка была сделана в июле 2013 г. можно считать, что все выявленные изменения площади водоемов и влажности ПРС произошли за один год, в результате нарушения естественного поверхностного стока. В случае непринятия каких-либо инженерно-геологических мер не исключается более существенное увеличение влажности грунтов в последующие годы. Процесс может сопровождаться увеличением глубины сезонно-талого слоя, осадкой грунтов, образованием новых мелких водоемов их смыканием, развитием эрозии и термоэрозии. Учитывая относительно невысокую льдистость грунтов и отсутствие залегающих близко к поверхности пластовых льдов и снежников, вероятность развития термокарстовых процессов в районе ВПП невысока. При фильтрации избыточной влаги под отсыпку ВПП не исключено нарушение теплового баланса мерзлых грунтов, что может привести и к оседанию грунтов и к их пучению.

Аномальное снижение площади водоемов и влажности ПРС в верхнем правом углу карты может быть связано с дефицитом влаги поступавшей с запада, и скопившейся в районе поворота дороги. В то же время следует иметь в виду разницу в датах

космической съемки, поскольку период с июня до середины июля характеризуется активным поверхностным стоком. В начале июля зона хасырея на этом участке может быть более обводненной, а к 19 июля дренируется по естественным причинам. Приведенное обстоятельство никак не распространяется на обозначенные участки повышения влажности ПРС, поскольку фактор времени, в данном случае, влияет только на общее снижение влажности ПРС, а не на ее повышение.

На данный район с использованием этих же КС была построена карта геокриологических условий с обозначением участков вероятного развития ОГП. В дальнейшем комплексный анализ геокриологических карт, карт изменения гидрологического состояния и влажности ПРС, построенных по КС, позволит более детально определить участки вероятного развития ОГП, прогнозировать их тип и направленность, а также выработать рекомендации по проведению адресных инженерно-геологических мероприятий для снижения рисков развития деформационных процессов. На данном этапе основной рекомендацией является необходимость создания эффективной обводной системы дренирования в районе ВПП, обеспечивающей условия поверхностного стока адекватные естественным, существовавшим до начала строительства. То же самое касается участка дороги, соединяющей ВПП с другими объектами инфраструктуры. Развитие ситуации с влажностью грунтов и водоемами может контролироваться по данным ежегодных, повторных космических съемок сверхвысокого пространственного разрешения, на основе разработанной методики, как альтернативы дорогостоящей аэросъемки, применяемой для этих целей.

В целом, полученные результаты могут быть использованы при разработке нормативно-методической документации для крупномасштабного гидрологического и геокриологического картографирования и мониторинга, выявления и прогнозирования участков вероятного развития ОГП в районах строительства и функционирования объектов нефтегазового комплекса в Арктической зоне.

Изучение глобальной проблемы развития Арктической зоны РФ связано с обеспечением стабильной надежной работы Северного морского пути, который позволит связать все промышленные и хозяйственные узлы России.

### **3. Геодинамические факторы техногенной оценки воздействия на ландшафт при разработке нефтегазовых месторождений [7, 8]**

Существующая нормативная база для экологической оценки состояния компонентов ландшафта (воздух, поверхностные воды, почвы и растительность) не предназначена для целей определения зон изменения локальных ландшафтов и их влияния на изменения проектных параметров грунтов оснований зданий и сооружений.

Известно, что определяющим признаком геопространства является его организация и упорядоченность, поэтому выявление организации в географических системах состоит в выделении устойчивых структур и в поиске механизмов взаимосвязей разнородных по генезису и темпам изменения геокомпонентов. Под упорядоченностью понимается пространственно-временная иерархия форм геопространства и/или процессов, составляющих целостную взаимосвязанную структуру ландшафта. Таким образом, упорядоченность является важнейшим атрибутом организации, которая проявляется через многообразие природных форм, а также временных вариаций природных процессов, где имеют место ритмические, трендовые, пульсационные и шумовые компоненты.

Ведущую системообразующую роль здесь играет сама физическая поверхность земли как универсальный интегрирующий фактор, превращающий происходящие в поле инсоляционных и гравитационных сил взаимодействия в определенные территориальные структуры. Поэтому геопространство рассматривается не только как

вместилище земных тел и явлений, но и как определенный их образ, а также структура, обусловленная движением, перемещением субстанций.

На данный момент в географии для равнинных пространств, в основном, разработаны теоретические представления и методы организации ландшафтных систем на региональном уровне. Главными ее факторами является географическая зональность, определяемая наличием в географическом пространстве свойств векторности (наибольшая контрастность значения признака), и природно-территориальная структура, определяющаяся градиентами значений, характеризующими данную систему. Поэтому, основными механизмами изменения структуры поверхности Земли в данном масштабе являются тектонические и климатические процессы, характеризующиеся вековыми циклами и набором эрозионных процессов, хорошо изученных на основе теоретических и практических исследований, сопутствующих характеру этих изменений.

В связи с чем, принято считать, что тектонический фактор играет подчиненную роль в современных процессах рельефа образования, так как смена тектонических обстановок, приводящих к изменению рельефа поверхности, проявляется на геологических временах.

Существующие попытки разработать методы организации ландшафтных систем платформенных территорий на локальном уровне не всегда увязываются со скоростями геодинамических процессов, которые сказываются, в основном, на региональном уровне, причем скорость этих региональных поднятий измеряется миллиметрами в год, что не может оказать существенного влияния на процессы преобразования рельефа.

Локальный и зональный уровни организации геопространства, в большей степени, определяется наличием зон сноса, аккумуляции и устойчивого равновесия, которые зависят от морфоскульптурных элементов рельефа, его литогенной основы, наклона земной поверхности и изменении этих характеристик во времени. Скорость изменения форм рельефа зависит от физико-механических и физико-химических свойств горных пород, а также формирующихся на них почв и покрывающих их растительных сообществ. Таким образом, в основе динамических преобразований рельефа поверхности для локального масштаба территорий являются процессы перераспределения массы горных пород под действием различных градиентов (силы тяжести, потока вещества и т.п.), которые определяются степенью расчлененности рельефа, и понятием локального базиса эрозии.

Проведение детальных и систематических исследований современных геодинамических процессов (начало и конец которых, фиксируются периодическими или непрерывными наблюдениями), проводившиеся на геодинамических полигонах, расположенных как в сейсмичных, так и в асейсмичных районах позволили получить принципиально новые данные об уровне современного геодинамического состояния недр. Принципиальным в этих исследованиях явился тот факт, что высоко градиентные движения, превышающие на порядок уровень региональных, связан не с вертикальными перемещениями бортов разломных зон, а проседанием горных пород, происходящим в локальных объемах самих разломных зон. Измерения, проводившиеся в пределах платформенных и орогенных территорий, имеющих различное геологическое строение и географическое положение позволили выявить приуроченность наиболее интенсивных современных вертикальных движений земной поверхности к зонам разломов, имеющих ширину от 0,1 до 1,5-2,0 км. Необходимо также отметить, что активизация данных процессов выше в асейсмичных регионах, т.к. разрядка напряжений в сейсмичных регионах происходит дополнительно через сейсмические события.

Эндогенные региональные процессы имеют длительность порядка сотен тысяч лет, а,

следовательно, определяют, в первую очередь, региональный фон и характер напряженного состояния горных пород, в условиях которых формируются региональные системы ландшафтов, развитие которых подчинено, в основном, географической зональности.

С другой стороны, полученный экспериментальный материал, несомненно, указывает на локальную пространственно-временную нестабильность (неустойчивость) процессов деформирования земной поверхности, имеющих место в пределах собственно разломных зон.

Выявленные временные рамки и параметры активных участков проявления вертикальных движений земной поверхности позволяют по-новому взглянуть на локальные процессы изменения рельефа земной поверхности. Это явления связанные с опусканием локальных участков земной поверхности (подтопление, заболачивание территории, изменение русловых процессов, геохимического состояния подземных вод, а также разрушение и образование геохимических барьеров и т.п.). То есть, различные процессы, связанные таким понятием как изменение базиса эрозии, могут приводить к активизации геологических процессов, таких как оползни, оврагообразование, карст, термокарст, развитие хасыреев, спуск озер в районах с развитием многолетнемерзлых пород, и т.п., приводящих к более быстрому изменению рельефа земной поверхности.

Таким образом, выявленный фактор проявления геодинамических процессов в разломных зонах позволяет с современных позиций в географии выявить новые механизмы, определяющие динамику локального уровня географического пространства, а также понять связь и периодичность возникновения опасных геологических процессов, влияющих на изменение структуры земной поверхности, и, как следствие, ландшафтных условий территории.

Поэтому природные процессы, связанные с формированием ландшафтных систем и их экологическая значимость для территорий, на которых проживает человек и осуществляет свою деятельность, являясь по своей сути многокомпонентными, должны учитывать и те глубинные процессы, которые по скорости воздействия на ландшафт можно определить как *современные, соизмеримые с антропогенным воздействием*.

Необходимо также отметить, что повторные геодезические и сейсмологические наблюдения показали, что активизация разломных зон при разработке месторождений нефти и газа имеет не только природный, а техногенно-индуцированный характер. Это означает, что в пределах территорий разрабатываемых месторождений современные изменение структуры рельефа земной поверхности и ландшафтных условий, обуславливаются интенсивностью техногенных факторов воздействия на недра и, как следствие, на ослабленные участки недр, представленные зонами разломов.

Не учет геодинамических факторов при разработке нормативных и проектных документов экологического характера для освоения месторождений углеводородов приводит к тяжелым экономическим последствиям, вызванным аварийностью скважин, трубопроводных систем и промысловых сооружений, а также к трансформации ландшафтных структур в целом и потери биологического ресурса территории.

Проявление современных геодинамических процессов в разломных зонах позволяет выявить новый фактор современных процессов изменения рельефа земной поверхности и ландшафтных условий на локальном уровне географического пространства, а также оценить связь и ритмику возникновения опасных геологических процессов. Данный фактор наиболее сильно может оказывать воздействия в пределах территорий, расположенных в криолитозоне, где заболачивание и подтопление территорий может приводить к резким изменениям альбедо поверхности и активизации термокарстовых и термоэрозионным процессам.

Сегодня, в связи с новыми экономическими отношениями между государством и

недропользователями, необходима разработка стратегии по оценке изменения состояния и методам контроля ОС для объектов ТЭК на основе современных научных достижений и разработок.

Важно законодательно утвердить ландшафтный подход в стратегии освоения территорий, а особенно в районах добычи углеводородов.

Дать возможность законотворческих инициатив органам Ростехнадзора и Министерству природных ресурсов совместно с институтами Российской Академии наук, которые могут выступать экспертами данной политики для доработки существующей нормативной базы на предмет новых требований к охране окружающей среды на основе ландшафтного подхода. Опыт и научные кадры в стране по решению этих вопросов сегодня ещё имеется, в связи с чем, очень важно, направить в это русло творческие кадры молодежи, которой будет передан научно исторический опыт природопользования русских и российских ученых, а также мировые достижения в области измерительных систем и технологий природопользования.

#### **Общие выводы.**

Необходимо разработать научно-методические рекомендации для мониторинга выявления и прогнозирования вероятного развития негативных природно-техногенных процессов, в том числе геодинамических, в районе строительства и функционирования объектов нефтегазового комплекса в арктической зоне. Изучение глобальной проблемы развития Арктической зоны РФ связано с обеспечением стабильной надежной работы Северного морского пути, который позволит связать все промышленные и хозяйственные узлы России.

Успешное освоение углеводородных ресурсов Арктики во многом будет зависеть от степени решения проблем, связанных с экологической и промышленной безопасностью освоения региона, таких как строительство промысловых объектов в условиях многолетнемерзлых грунтов и гидратонасыщенных отложений; максимально возможным учетом рисков освоения Арктики в экстремальных горно-геологических и природно-климатических условиях.

1. А.Н.Дмитриевский. *IV ежегодная конференция института адама Смита «Промышленная и экологическая безопасность нефтегазовых проектов»*, г. Москва, март 2014 г.

2. В.М. Максимов, Л.Г. Кульпин, М.К. Тупысев, С.М. Пронюшкина. *Ж. Арктика: экология и экономика*, 2014, **4(16)**, 60-67.

3. В.М. Максимов, Л.Г. Кульпин, М.К. Тупысев, С.М. Пронюшкина. *Ж. Бурение и нефть*, 2015, **1**, 24-29.

4. Л.Г. Кульпин. *Ж. Нефтяное хозяйство*, 2004, **9**, 76-79.

5. Л.Г. Кульпин, С.М. Пронюшкина. *Ж. Oil@Gas Journal Russia*, 2013, **8**, 66-69.

6. С.Г. Корниенко, Л.Н. Крицук, Н.Н. Хренов, К.И. Якубсон, Н.В. Ястреба. *Ж. Инженерные Изыскания*, 2014.

7. А.И. Никонов, М.К. Тупысев, Е.С. Шаповалова, М.П. Юрова. *Ж. Нефтепромысловое дело*, 2014, **12**, 51-56.

8. А.И. Никонов. *Ж. Маркшейдерский вестник*, 2014, **4**, 41-48.