

УДК 622.279

Современные технологии гравиметрического мониторинга для контроля последствий отбора газа из недр

С.А. Кирсанов (ПАО «Газпром», РФ, Санкт-Петербург), **О.Б. Арно, А.В. Меркулов, А.К. Арабский** (ООО «Газпром добыча Ямбург», РФ, Новый Уренгой), **Д.С. Андреев, Е.Д. Картелян** (ООО «ТНГ-Казаньгеофизика», РФ, Казань), **П.Р. Афанасьев** (ООО «Ямальская геологическая экспедиция», РФ, Уренгой)
E-mail: S.Kirsanov@adm.gazprom.ru

Арктика через 50 лет может стать одним из основных источников энергоресурсов и других полезных ископаемых, а также ключевым транспортным узлом планеты. Поэтому базовой задачей всех арктических государств становится широкое внедрение ресурсосберегающих, «умных», прорывных технологий, способных работать в гармонии с природой и человеком. В частности, известно, что негативным техногенным последствием разработки месторождений природного газа является напряженно-деформированное состояние вмещающих пород под действием горного давления, усиливающееся по мере извлечения запасов из недр. Для снижения рисков потенциальных геозкологических последствий на Заполярном и Тазовском месторождениях создана специализированная база данных, наиболее полно отражающая геологическое и геодинамическое строение территорий. Создать ее удалось с применением прецизионных гравиметрических исследований, системы глобального позиционирования, современных программных средств и космических технологий.

Ключевые слова: гравиметрический мониторинг, система маркшейдерско-геодезического мониторинга, система глобального позиционирования, геодинамический мониторинг, геозкологическая безопасность.

Цена арктического вопроса много выше миллиардов баррелей нефти и газа, алмазов, золота и редкоземельных элементов. При безответственном отношении к Арктике сегодня – завтра весь мир и Россия могут получить не глобальные преимущества, а глобальные проблемы.

Выступая на Международном форуме «Арктика – территория диалога» в 2010 г., премьер-министр РФ В.В. Путин назвал главные приоритеты России и планы освоения Арктики в указанном ключе.

В частности, Россия выступила с инициативой проведения Международного

полярного десятилетия с центральной темой – изучение глобального изменения климата и проблем, которые напрямую или косвенно связаны с освоением Арктики.

Рассмотрим одну из них – негативные техногенные последствия разработки месторождений природного газа в виде изменяющегося напряженно-деформированного состояния вмещающих пород. В результате возрастают риски просадки земной поверхности, образования разломов, активизации суперинтенсивных движений на разломах и повышения потенциальной сейсмической активности района.

Обычные вековые смещения поверхности характеризуются однонаправленными движениями на обширных пространственных территориях со скоростью до нескольких миллиметров в год. Суперинтенсивным движениям свойственны высокие средние скорости изменений (до нескольких сантиметров в год); как однонаправленность, так и знакопеременность направлений движения; приуроченность не к блокам земной коры, а к зонам разломов, ведущая к пространственной локализации геодинамических явлений.

Разработка месторождения сопровождается обширными просадками и поднятиями земной поверхности. Обычно их скорость составляет 1–2 см/год, но иногда встречаются просадки с амплитудой в несколько метров, вызывающие опасные последствия: сильные деформации наземных сооружений, разрывы трубопроводов и др. Потенциальная опасность этих процессов потребовала создания системы маркшейдерско-геодезического мониторинга геомеханических, геодинамических и геокриологических процессов. Базой ее создания стал Закон РФ «О недрах» и Постановление Правительства РФ № 392 «О лицензировании производства маркшейдерских работ». Такая система реализована на Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ) и предусматривает наблюдение за состоянием горных отводов, определение опасных зон и мер по охране горных разработок, зданий, сооружений и природных объектов. Они регламен-

тированы Инструкцией по производству маркшейдерских работ РД-07-603-03.

С опорой на нее разработаны методические основы маркшейдерско-геодезических наблюдений за движением земной поверхности и деформацией технологических объектов с использованием методов космического зондирования Земли и геоинформационных систем. Современное программное обеспечение и космические технологии позволили создать картографическую основу Заполярного и Тазовского месторождений, отражающую геологическое и геодинамическое строение территорий. Она базируется на интеграции топографо-геодезических, геолого-экологических, геолого-маркшейдерских и спутниковых данных, позволивших определить местоположение зон развития геодинамических процессов, обусловленных разработкой месторождения. Уточнены координаты объектов инфраструктуры месторождения, разработан и реализуется проект геодинамического полигона для мониторинга геомеханических, геодинамических и геокриологических процессов на Заполярном НГКМ и Тазовском ГНKM. Впервые выявлены области просадок земной поверхности в контуре месторождения на основе использования космических снимков высокого разрешения совместно с космической радарной интерферометрией. Выявленные с их помощью области оседаний земной поверхности полностью подтверждаются результатами измерений, полученными при высокоточном определении координат и высот пунктов наблюдения гравиметрического мониторинга. Результаты уже проведенных исследований позволяют обосновать периодичность наблюдений за геодинамическими процессами на месторождениях и свести к минимуму объем высокоточных и трудоемких полевых работ с применением традиционных методов (нивелирование 2-го класса). Построена карта смещений земной поверхности по степени опасности в пределах горного отвода Заполярного месторождения по результатам повторных радарных съемок и данных дистанционного зондирования Земли.

Основные требования, предъявляемые к организации геодезического мониторинга

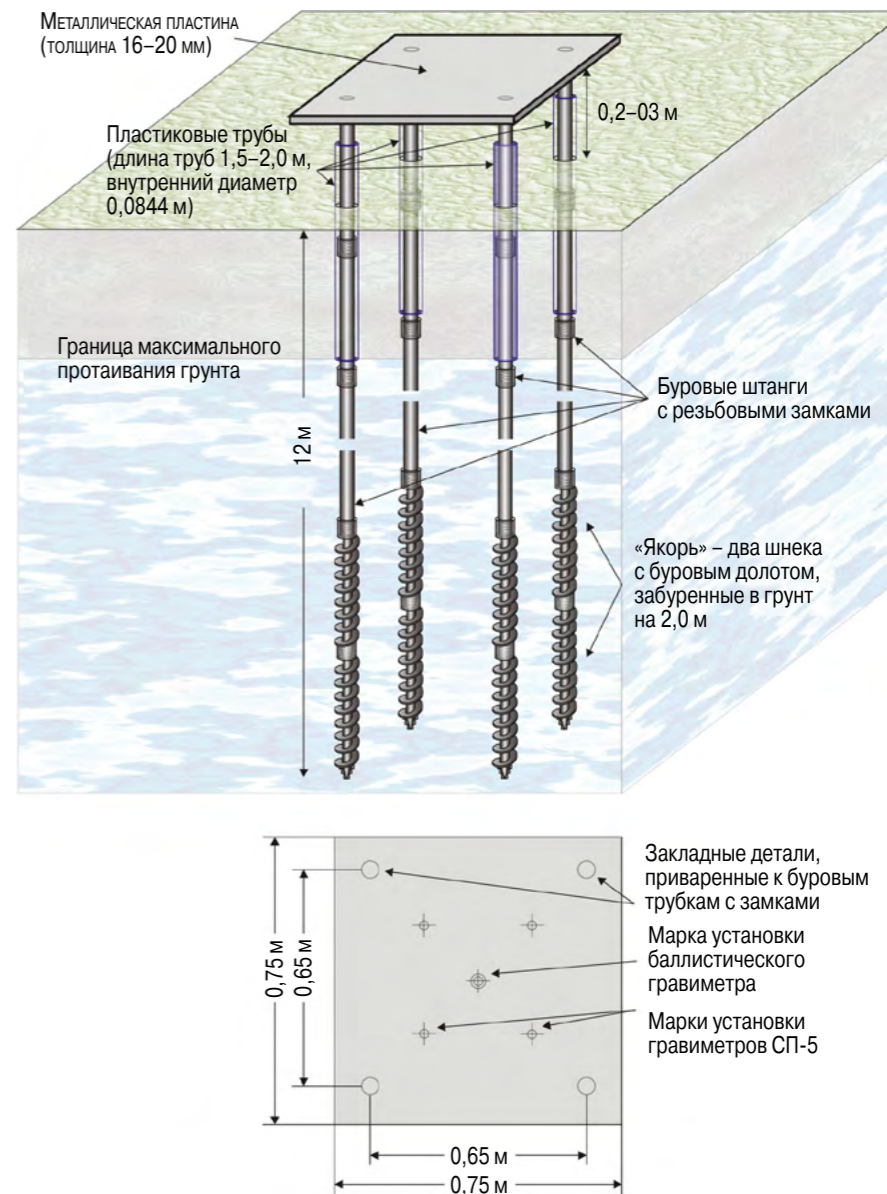


Рис. 1. Конструкция и схема долговременного гравиметрического пункта наблюдений

геодинамических процессов Заполярного НГКМ:

- сеть пунктов наблюдения должна обеспечить решение задач мониторинга процессов, обусловленных отбором газа из залежи;
- измерения должны производиться на рядовых пунктах, расположенных внутри объекта исследования, и опорных пунктах, расположенных за его пределами;
- опорные геодезические пункты мониторинга располагают за пределами контура газоносности в точках, где отсутствует влияние эффектов газодобычи.

Число законтурных пунктов определяется размером месторождения, особенностями его геологического строения, геоморфологической и орографической обстановкой, другими природными и техногенными факторами. С учетом этих условий было определено пять законтурных опорных пунктов.

На Заполярном НГКМ с 2003 г. ведется инновационный гравиметрический мониторинг разработки месторождения [1], который требует проведения прецизионных геодезических измерений. Такие же

* Андреев О.П., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А. и др. Комплекс новых методов контроля разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Минимизация техногенного воздействия на окружающую среду. – СПб.: Наука, 2010. – 162 с.

измерения необходимы и для ведения геодезического мониторинга месторождения. Поэтому удалось минимизировать затраты на их проведение, используя общую для них наземную и радарную космическую съемку, данные высокоточных геодезических наблюдений. Рассмотрим такую комбинированную систему.

Рядовые пункты мониторинга разработки газовой залежи необходимо оборудовать на каждой наблюдательной скважине в периферийной части месторождения, а также на всех эксплуатационных кустах газодобычи.

При организации долговременных гравиметрических пунктов мониторинга следует ориентироваться на места, наиболее предпочтительные с точки зрения минимизации количества помехообразующих факторов. В условиях Заполярного НГКМ им соответствуют возвышенные участки, сложенные песчанистыми почвами. Следует избегать почв с большим содержанием торфа.

В периферийной части Заполярного НГКМ установлены долговременные гравиметрические пункты специальной конструкции (рис. 1). Они через 2–3 года после установки не имеют высотных подвижек

и используются для оценки геодинамических процессов на территории всего месторождения.

На стадии разработки проекта наблюдательной сети гравиметрического мониторинга месторождения при размещении пунктов наблюдения следует использовать данные о предполагаемых зонах подъема газоводяного контакта (ГВК), которые получают по результатам анализа геологического строения исследуемой залежи.

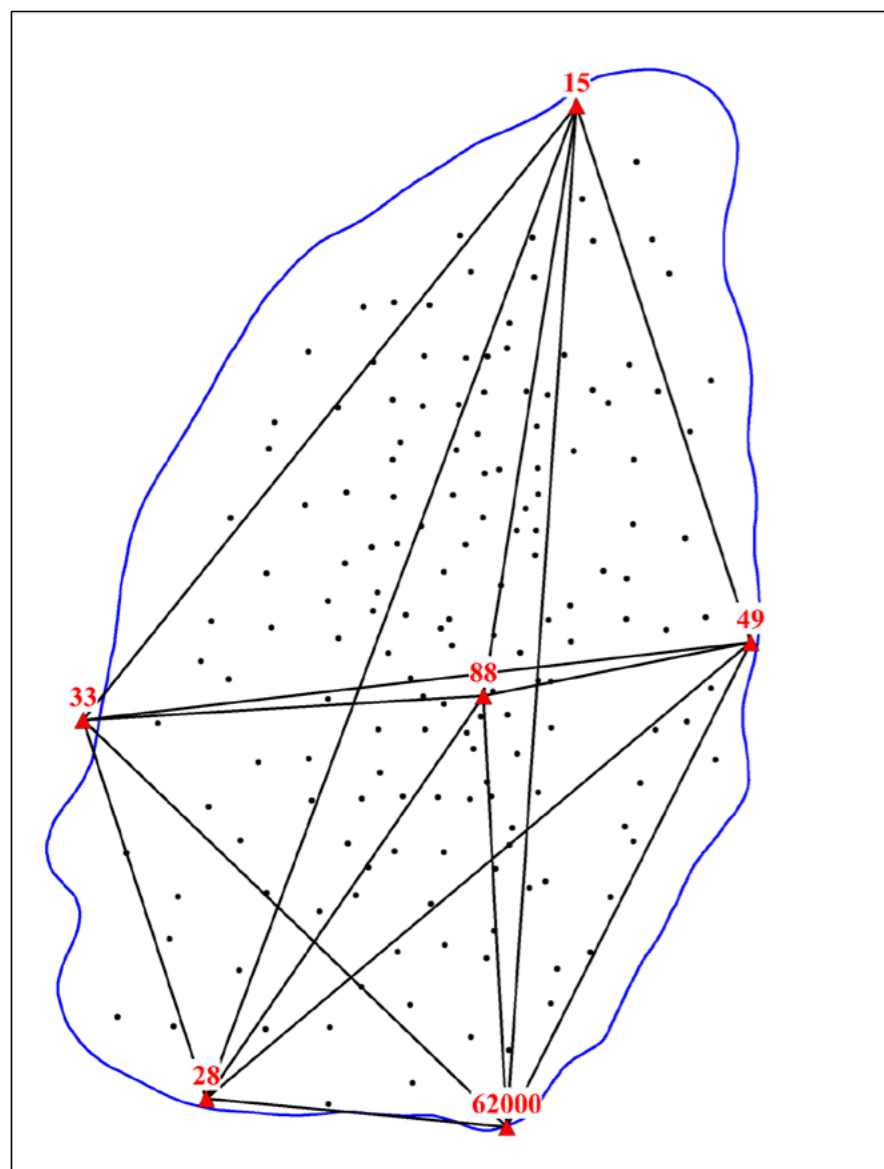
Эксплуатация газовой залежи характеризуется появлением участков локального подъема ГВК. На этих участках необходимо увеличить число пунктов наблюдательной сети, а за пределами эксплуатационной зоны сеть пунктов может быть разреженной. Однако анализ результатов предыдущих этапов мониторинга может потребовать сгущения сети пунктов периферийной части месторождения, тогда это решение необходимо оперативно исполнить.

В настоящий момент на Заполярном НГКМ функционирует сеть из 169 пунктов гравиметрического мониторинга. Из них 5 пунктов – за контуром месторождения и 94 пункта – в периферийной части и между кустами газовых скважин, а непосредственно на кустах газодобычи – 75 пунктов. Эта сеть обеспечивает решение геологической задачи – контроль подъема уровня ГВК по всему месторождению. В дальнейшем, когда продвижение подошвенной воды примет более дифференцированный характер, потребуется оборудование дополнительных пунктов наблюдения.

Комплекс высокоточных геодезических измерений в рамках гравиметрического мониторинга используется параллельно для оперативной оценки активности опасных геологических процессов (геодинамический мониторинг). Он включает:

- привязку пунктов геодезической опорной сети к государственной геодезической сети;
- геодезические измерения на пунктах гравиметрического мониторинга;
- геодезические спутниковые измерения на опорных и рядовых пунктах геодинамического мониторинга;
- контроль выполненных работ.

Создание и поддержание сети пунктов геодинамического полигона для мониторинга подвижек земной поверхности традиционными методами очень затратно. Традиционные геодезические методы изме-



○ – Контур газонасыщенности
▲ – Опорные геодезические пункты
• – Пункты гравиметрического мониторинга

Рис. 2. Схема опорных геодезических пунктов на Заполярном НГКМ

рений требуют больших средств и времени. Снизить издержки этих работ на Заполярном НГКМ удалось, применяя спутниковые системы глобального позиционирования NavStar (США) и ГЛОНАСС (Россия). С их использованием основной комплекс полевых и вычислительных работ по опорной геодезической сети Заполярного НГКМ был выполнен в период с 2006 по 2009 г.

Опорная геодезическая сеть за пределами контура газонасыщенности оборудована на разведочных скв. 15, 28, 33, 49, 62 и имеет один пункт в центре месторождения на бетонной тумбе ликвидированной разведочной скв. 88 (рис. 2). Работа базовых станций опорной геодезической сети в течение всего полевых сезона осуществлялась непрерывно, позволяя ежедневно контролировать взаимное положение пунктов и положение центрального опорного пункта № 88 (находящегося в области с наибольшими деформациями земной поверхности) и качество измерений на рядовых пунктах наблюдения.

В целях оптимизации работ по обслуживанию и исключению негативного влияния на природную среду в 2015 г. на законтурных базовых геодезических пунктах Заполярного НГКМ были проведены тестирование и запуск в работу трех комплексов автономного спутникового геодезического оборудования удаленного доступа.

Данный геодезический комплекс состоит из приемника, комплекта бесперебойного питания, солнечной батареи и нескольких вариантов передачи данных, основанных на комплексе спутниковой связи и GSM-модема (рис. 3). Комплекс позволяет реализовать технологии точного и надежного позиционирования в сложных условиях с ограниченной видимостью небосвода и большого числа лучей. Его приемник оснащен блоком управления, представляющим собой промышленный микрокомпьютер с тактовой частотой процессора 700 МГц, оперативной памятью 512 Мб, памятью жесткого диска 128 Гб и поддержкой USB-носителей до 12 Гб. Модуль маршрутизации приемника обладает частотой процессора 600 МГц и объемом оперативной памяти 128 Мб. Передача данных осуществляется по каналам GSM/GPRS/3G/4G/LTE. В условиях Заполярного НГКМ (рис. 4.) и значительных расстояний между опорными геодезическими пунктами этот комплекс



Рис. 3. Автономный спутниковый измерительный комплекс с антенной для сотовой связи и солнечными батареями

позволяет определять положение пунктов опорной геодезической сети с точностью не менее 5 мм.

Система автономного энергоснабжения комплекса работает на базе комбинации топливных элементов EFOY Pro и солнечных батарей. Рабочая температура в боксе EFOY Pro составляет –20...50 °С. В условиях отрицательных температур в процессе работы происходит прогрев бокса, и дополнительное отопление не требуется. В качестве топлива EFOY Pro применяется метиловый спирт, залитый в специальный одноразовый

картридж объемом 28 л. Данная емкость содержит 31 кВт·ч электроэнергии и весит всего 24 кг. Картриджи EFOY сертифицированы и соответствуют самым строгим требованиям безопасности. Специальный клапан предотвращает просачивание топлива и позволяет осуществлять транспортировку любым видом транспорта.

В процессе работы система подзаряжает буферный аккумулятор, питающий потребителей электроэнергии. Управление режимами автономной работы EFOY Pro осуществляет контроллер, обеспечивающий оптимальность циклов заряда-разряда. Помимо автоматического управления система EFOY Pro имеет возможность удаленного управления оператором при помощи команд, передаваемых по каналам связи.

Для экономии топлива системы EFOY Pro параллельно подключены и применяются солнечные батареи, позволяющие в условиях полярного дня снизить расход топлива до 50 %. Напряжение постоянного тока с солнечных батарей через контроллер попадает на аккумулятор и заряжает его, обеспечивая долговременную и надежную работу аккумуляторной батареи.

На законтурных базовых пунктах № 49 и № 28 передача геодезических данных возможна по сотовой связи GSM в формате 3G и 4G. Из-за природных факторов (низина в рельефе и залесенность) на законтурных базовых пунктах № 15, 33 и 62000 передача данных возможна только по спутниковой связи.



Рис. 4. УНПГ-ЗС Заполярное месторождение



Рис. 5. Бурение скважин на Тазовском месторождении

В августе 2015 г. на трех законтурных базовых геодезических пунктах выполнено тестирование автономной спутниковой системы удаленного доступа. На базовой станции № 28 автономная спутниковая система работала непрерывно 9 нед. На этой же геодезической базовой станции связь осуществлялась и по GSM-каналу (сотовая связь). В третьей декаде августа на законтурные базовые станции № 33 и 49 были установлены спутниковые антенны для передачи данных. На этих базовых станциях

автономные комплексы проработали непрерывно до конца полевого сезона (4 нед).

После установки автономных геодезических комплексов на трех из шести базовых геодезических пунктов отпала необходимость ежедневной замены аккумуляторов и ежедневного скачивания зарегистрированных данных. Каналы связи комплексов позволяют в режиме реального времени отслеживать число задействованных спутников, уровень сигнала связи, внешнюю и внутреннюю температуру комплекса, тип источника и уровень энергопитания и др. Передача данных с автономного геодезического комплекса производится каждый час.

На остальных гравиметрических и геодезических пунктах для приема информации с орбитальных спутников используются 75-канальные и двухсистемные спутниковые геодезические приемники R-5, R-7, R-10 фирмы Trimble.

Это позволило реализовать на Заполярном НГКМ комплекс полевых и камеральных работ по определению планово-высотного положения 169 гравиметрических и 107 геодезических пунктов наблюдений. Из них данные по 161 пункту используются для целей геодезического мониторинга.

На геодезических пунктах, совмещенных с гравиметрическими пунктами, длительность сеанса спутниковых измерений составляет 3 ч и более, в зависимости от его удаления от опорных геодезических пунктов.

На эксплуатационных и разведочных скважинах спутниковая антенна устанавливается на верхнем элементе устья скважины на магнитной подставке или жестко закрепленном адаптере принудительного центрирования. На пунктах, расположенных на бетонных кубах ликвидированных скважин и специально оборудованных гравиметрических пунктах, антенна располагается на двухметровой вешке, установленной на гравиметрическую марку. При наличии препятствий (деревья, устья скважин) антенна устанавливалась на высоте 1,4–2,0 м. Угол возвышения спутников над горизонтом устанавливается в 15°. Интервал сбора данных – 15 с.

Обработка и уравнивание базисных линий выполняется в программе Trimble Business Center v.3.04 по мере поступления полевых данных. Математическая обработка геодезических измерений включает: полевые вычисления, уравнивание сетей, составление каталогов координат и высот пунктов. Все отметки геодезических и гравиметрических пунктов получены в системе эллипсоидальных высот, а координаты – в системе WGS84.

Все использованные в полевых работах геодезические приборы сертифицированы и рекомендованы к применению по назначению на территории РФ.

На пунктах, расположенных на кустах газодобычи, сеансы измерения высот и координат проводятся не менее трех раз. Для периферийных пунктов, расположенных на скважинах, определение планово-высотного положения выполняется не менее двух раз с погрешностью измерений не более 0,8 см.

Для контроля получаемые высоты геодезических пунктов сравнивают со значением их высот, полученных в предыдущие годы. Если результат анализа динамики изменения высот геодезических пунктов за предыдущие годы наблюдений не коррелируется с многолетним трендом изменения высот определяемого и соседних геодезических пунктов, то проводятся дополнительные измерения.

Полученные в ходе гравиметрического мониторинга данные геодезических измерений являются основой геодезического мониторинга, проводимого в целях определения изменений положения земной поверхности на Заполярном месторождении. По результатам анализа

геодезических материалов сформирован Сводный каталог геодезических данных мониторинга Заполярного НГКМ по годовым этапам наблюдений за период с 2006 по 2014 г. включительно. Итоговый анализ этих данных проводится последовательно, от предыдущего этапа проведения работ к последующему. Вычисляются разности высот земной поверхности, образовавшиеся между этапами наблюдений, и выделяются максимальные и минимальные значения этих разностей для выявления потенциальных ошибок. Для этого получаемые результаты оцениваются по критериям: конструкция пункта; условия приема спутникового сигнала и наличие помехообразующих факторов; их корреляция с многолетним трендом по пунктам наблюдений.

Для визуализации оценки геодезической ситуации территории Заполярного НГКМ (рис. 5, 6) на каждом этапе составляются накопительные карты изменения высотных отметок 107 пунктов. На них выделяются области с просадкой земной поверхности более 8 см и 10 см. Этого достаточно для районирования месторождения по степени активности геодезических процессов. Четко прослеживается то, что центральная часть месторождения наиболее подвержена геодезическим процессам. За период эксплуатации в районах кустов газодобычи произошло обширное опускание земной поверхности на величину от 5 до 10 см, а на отдельных участках – до 12 см. При этом интенсивность геодезических процессов уменьшается при удалении

от центра месторождения. Интерполяция данных от центра к границе месторождения и последующая их экстраполяция четко показывают, что за его границей интенсивность геодезических процессов существенно ниже, но она есть. Это подтверждает целесообразность проведения геодезического мониторинга именно на основе данных геодезических наблюдений, выполняемых в процессе гравиметрического контроля разработки месторождения, позволяя дать оценку территории, существенно превышающей контуры лицензионных участков. А это уже мониторинг геоэкологической безопасности регионального значения и одно из решений сложнейших задач безопасного, с точки зрения геоэкологии, освоения российского сектора Арктики.

Modern gravimetric monitoring technology: Implications of gas recovery

Kirsanov S.A. (PAO Gazprom, RF, St. Petersburg), Arno O.B., Merkulov A.K., Arabskiy A.K. (OOO Gazprom Dobycha Yamburg, RF, N. Urengoy), Andreyev D.S., Kartelyan E.D. (OOO TNG-Kazan'geofizika, RF, Kazan'), Afanas'yev P.R. (OOO Yamal geological expedition, RF, N. Urengoy)

E-mail: S.Kirsanov@adm.gazprom.ru

Over the next 50 years, the Arctic region is expected to become one of major global energy producers as well as a key transport hub in our planet. Therefore, wide-scale implementation of smart, disruptive resource conservation technologies capable to equally meet engineering and environmental goals is believed to be among the central tasks for all states adjacent to the Arctic region. In particular, it is widely known that upstream gas development commonly affects country rock stress-strain behaviour under progressively growing overburden in line with gas recovery. A comprehensive database is set

up for Zapolyarnoye and Tazov fields at present, believed to help reducing potential geological and environmental implications. Licensed gravity studies, GPS along with advanced software and space technology were the most valuable tools for this database.

Keywords: gravimetric monitoring, downhole and geodetic survey, GPS, geodynamic monitoring, geologic security, environmental compliance, database.

Статья размещена на договорной основе.

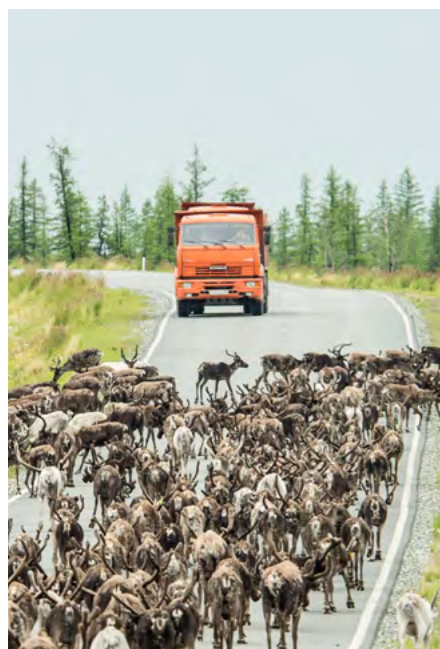


Рис. 6. На Заполярном месторождении