

## **«ОСОБЕННОСТИ ОТРАБОТКИ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА АРКТИКИ»**

Скляров Е.В.<sup>1</sup>, Алексеев С.В., Егоров К.Н., Алексеева Л.П., Козырева Е.А.,  
Гладков А.С., Кошкарев Д.А., Рыбченко А.А., Борняков С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Руководитель проекта*

<sup>2</sup> *ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения РАН (ИЗК СО РАН,  
Иркутск, Россия)*

*[SkI@crust.irk.ru](mailto:SkI@crust.irk.ru), [Koshckar@earth.crust.irk.ru](mailto:Koshckar@earth.crust.irk.ru)*

При эксплуатации месторождений полезных ископаемых открытым или подземным способом происходит необратимая перестройка компонентов природной среды, создаются предпосылки для развития негативных инженерно-геологических и геоэкологических процессов. Накопленный опыт свидетельствует о необходимости комплексного учета трансформации многокомпонентной природной системы и контроля состояния геологического пространства при эксплуатации месторождений. Основной задачей при этом является создание многокомпонентной модели месторождения и его эволюции в геологической истории.

Отработка коренных месторождений алмазов на Крайнем Севере Якутии сопряжена с серьезными проблемами промышленной безопасности, связанными с возможными геодинамическими процессами в условиях многолетней мерзлоты, притоками подземных рассолов, обладающих высокими напорами и разной интенсивностью. Неравномерная насыщенность отрабатываемых породных массивов месторождений газами и рассолами разного состава, нефтеносность кимберлитовых трубок и вмещающих пород создают определенные сложности производства горных работ в открытых и подземных выработках. Оценка степени трещиноватости, обводненности и газообильности пород глубоких горизонтов, реконструкция локальных и региональных полей тектонических напряжений, мониторинг состояния трещинных систем до и после проходки выработок с целью разработки рекомендаций по повышению их устойчивости и ликвидации притока подземных рассолов для безопасного ведения горных работ являются основой при планировании алмазодобычи. Недооценка значения параметров трещинных систем и неблагоприятного сочетания этих факторов при проходке, формировании и эксплуатации горных выработок, как правило, приводит к разному роду осложнениям и аварийным ситуациям.

Авторами разработан новый опытно-методический подход к созданию комплекса мониторинговых наблюдений деформационных явлений во вмещающем горном массиве и на конструктивных элементах карьеров. Используемый на практике комплекс включает в себя картирование участков проявления техногенных деформаций и наблюдения за температурным состоянием горного массива в их пределах. Основой комплекса служат инструментальные виды работ, такие как: георадиолокационное профилирование прибортовой части массива и берм основных эксплуатационных горизонтов, деформометрические наблюдения с использованием высокоточной лазерной техники и деформаметрических датчиков на различном удалении от борта карьера в потенциально опасных зонах, создание сети тектонофизических наблюдений на всю глубину карьера, а также комплексное изучение различных типов кимберлитовых руд для создания оптимальной схемы отработки месторождения. Весь комплекс работ прошел апробацию на карьерных полях коренных месторождений алмазов «Нюрбинская», «Комсомольская», «Удачная», «Зарница», условия отработки которых максимально приближены к природным и геологическим условиям

Арктической зоны. Т.е. для них характерны наличие многолетнемерзлых горных пород, специфическая ландшафтная обстановка (зоны арктических пустынь и тундровых почв), режим оттаивания и промерзания верхних слоев массива и конструктивных элементов карьера, влияние на экологическую обстановку прилегающих территорий горных отвалов и хвостохранилищ обоганительных фабрик. Соответственно, основной задачей выполненных работ являлась оценка инженерно-геологических процессов, происходящих в геологической и природной средах месторождений.

Научная и практическая значимость работ заключалась в создании реконструкции локальных и региональных полей тектонических напряжений, а также режимных наблюдений за поведением трещинных систем до и после проходки уступов в карьерных полях четырех коренных месторождений алмазов, которые явились основой для разработки рекомендаций по повышению устойчивости бортов карьеров и, соответственно, более безопасному и рациональному проведению открытых и подземных горных работ. Проведение геомеханического мониторинга вблизи крупных зон трещиноватости с целью прогноза поведения плоскостей разрывов в период резких температурных колебаний и смены геомеханических напряжений обуславливает выбор оптимального варианта технологии отработки конкретного алмазного месторождения. Кроме того, предложенная организация системы газового, гидрогеомеханического и геомеханического мониторингов состояния массива рудных тел в режиме реального времени с разработкой специальных мероприятий по технологии ведения горных работ обеспечивает условия безопасного нахождения персонала при алмазодобыче в опасных зонах карьерных и подземных выработок. Весь разработанный комплекс работ на коренных месторождениях алмазов Якутской алмазодобывающей провинции был проведен впервые.

Эталонным объектом для отработки комплекса мониторинговых исследований послужил карьер трубки «Нюрбинская». Данный карьер по разработке коренного месторождения алмазов расположен в зоне, климатические условия которой близки к арктическим. Основанием для постановки исследований послужили результаты реперных наблюдательных станций, установленных вокруг карьера, которые указывают на наличие устойчивых существенных подвижек части восточного борта карьера в направлении горной выработки. Участок характеризуется сложным мерзлотным, инженерно-геологическим и тектоническим строением, а также наличием горизонтов, потенциально благоприятных для развития процессов межслоевого скольжения и сдвижения грунтов. Также было установлено, что большая часть зафиксированных деформаций в пределах восточного борта приурочена к зонам разломов.

Для оценки опасности наблюдаемых смещений и разработки превентивных защитных мер был разработан и апробирован комплекс мониторинговых работ для изучения особенностей возникновения и проявления деформационных процессов в пределах горного массива и возможной оценки их влияния на конструктивные элементы бортов карьера. Комплекс включал в себя инженерно-геологические, георадарные и деформационные мониторинговые измерения.

Мониторинговые инженерно-геологические наблюдения и картирование поверхностных деформационных форм, выполненные в переходные периоды: весной (май) и осенью (сентябрь), позволили охарактеризовать особенности и динамику проявления и развития деформаций в пределах восточного борта карьера «Нюрбинский». Для оценки экзогеодинамического состояния массива использован критерий «пораженность территории формами деформаций». На основе сопоставления карт пораженности борта массива выявлено, что на фоне не затухающей активности проявления деформаций в юго-восточной части борта карьера, к осени проявилась активность в пределах северо-восточной части карьера (Рис.1). Для наиболее точного

отражения глубинных деформаций массива при оценке пораженности массива поверхностными формами деформаций учитывались формы в виде трещин, просадок, воронок. Из анализа были исключены формы, связанные с процессами выветривания и неглубоких гравитационных процессов (вывалы, осыпи и трещины прибортового отпора) (Рис.2). На основе выполненного инженерно-геологического районирования прибортовой части восточного борта карьера обосновано место положения наблюдательных термометрических скважин, в которых получены данные о динамике температурного режима грунтов за период с мая по сентябрь 2014 г. Установлена мощность деятельного слоя (4 м) и наличие высокотемпературных грунтов (в среднем температура составляет  $-0,96^{\circ}\text{C}$  до глубины 25 м). С глубиной температура грунтов понижается. Установлено, что в целом массив горных пород в скважине, расположенной в пределах слабонарушенного блока, находится в области более низких температур, тогда как средняя температура грунтов в скважине, пройденной в пределах участка развития деформаций, ниже на  $0.2^{\circ}\text{C}$ .

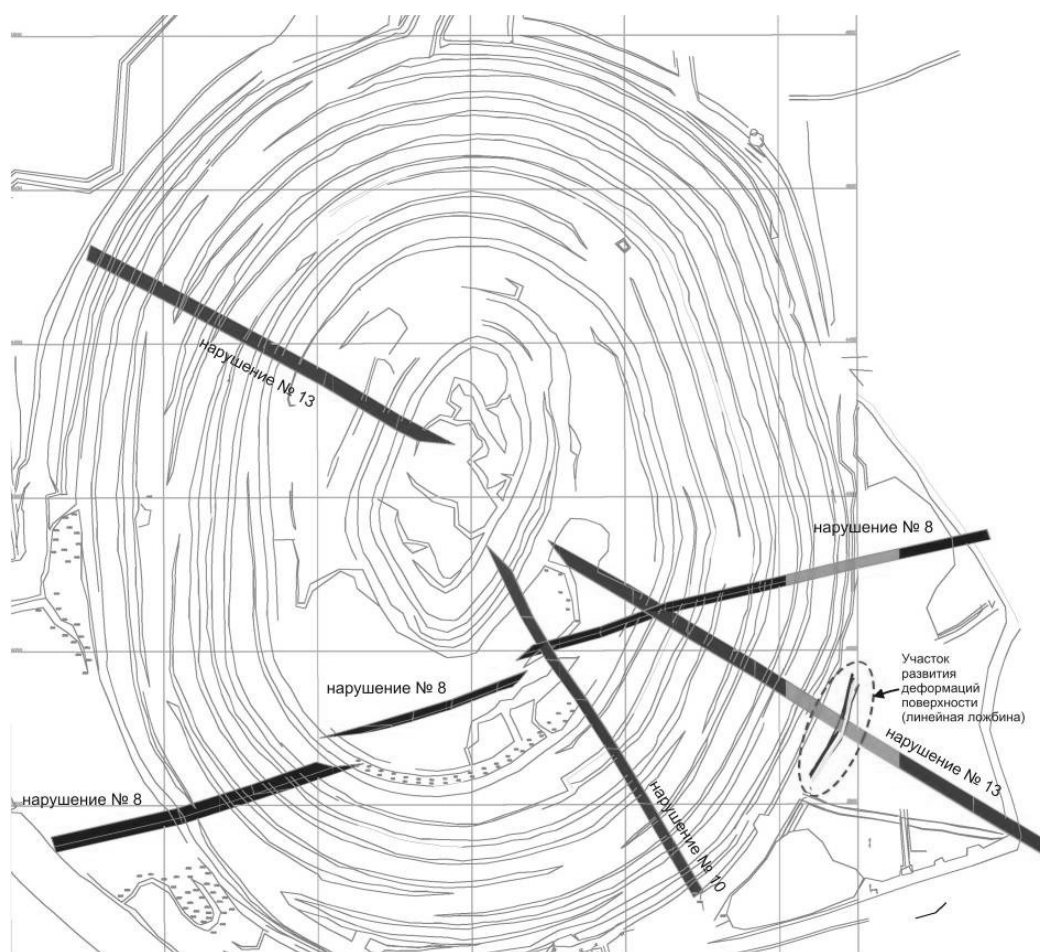


Рис. 1 - Схема разломов, секущих участок восточного борта карьера «Нюрбинский»  
Овалом обозначен участок деформаций земной поверхности.

Изучение керна скважин, сравнение суммарной влажности, криотекстур керна и данных температурных наблюдений позволило создать инженерно-геологический разрез и выделить зоны пластических деформаций, а также элементы вертикальных смещений. Установлено, что верхняя часть разреза до глубины 25 м, сложенная высокотемпературными грунтами, находится в состоянии предельного равновесия. При

изменении напряженного состояния в массиве высокотемпературные грунты испытывают пластические деформации и медленные смещения (течение).

Для изучения строения и динамики развития деформационных структур, формирование которых может быть связано с развитием оползневых процессов либо процессов бокового отпора, были выполнены георадиолокационные исследования. Для этого в пределах проблемного участка восточного борта карьера было создано 8 профилей, заданных вкрест простирания линейной структуры, в пределах которой на поверхности насыпи наблюдались раскрытые трещины и проседание грунта (Рис. 1). Наблюдения носили мониторинговый характер и были проведены в сентябре 2013 г., а также апреле, июле и ноябре 2014 г. При этом использовался российский георадар ОКО-2 с антенными блоками. АБ-90, АБ-250М и АБДЛ “Тритон”.

Пораженность (кол-во деформаций на участок):

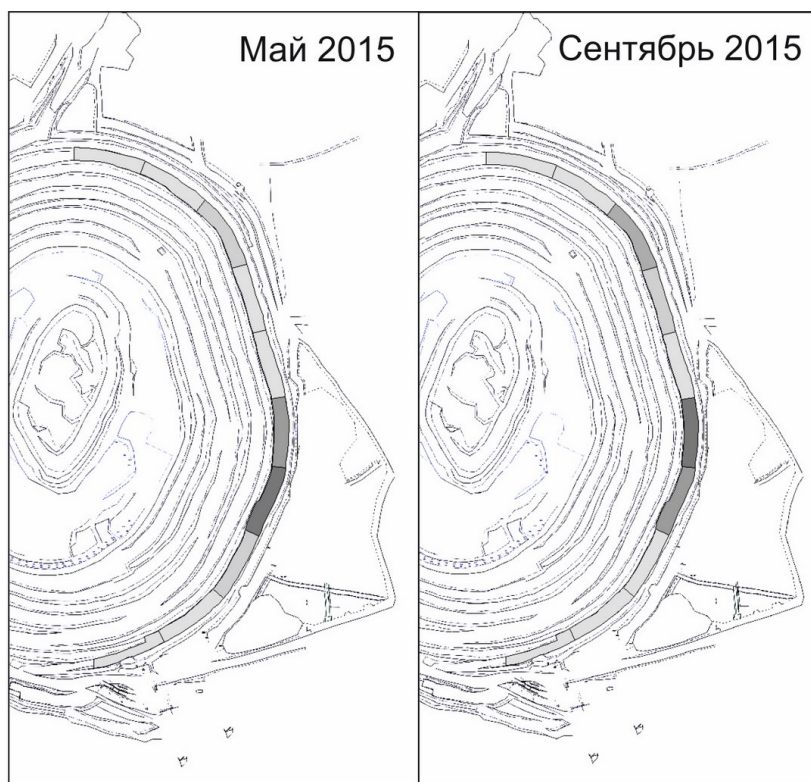
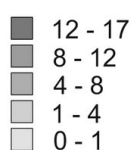


Рис. 2. Пораженность бермы карьера трубки «Нюрбинская» в мае и сентябре 2014 г.

Результаты георадарного профилирования (Рис. 3) свидетельствуют о наличии в пределах прибортового массива горных пород участков разуплотнения и снижения прочностных свойств. Одна часть данных участков отражает процесс активизации субвертикальных разрывных структур (трещин или зон трещиноватости), другая – указывает на наличие локальных объемов изменения свойств пород в пределах слоев или отложений различных свит. Установленные на разных временных этапах мониторинга изменения размеров, формы и положения субвертикальных структур свидетельствуют о «волновой» активизации трещинной сети в результате медленных смещений по внутрислоевым зонам пластического течения и межпластовым срывам.

Деформационный мониторинг выполнялся с сентября 2013 г. в пределах 244 горизонта на базах 5 метров в пунктах 1 и 2, где по данным георадарного профилирования имеются зоны разрывных нарушений шириной 3-4 метра. Штанговые датчики были установлены вкрест простирания этих зон на обсадных трубах скважин, пробуренных на 4 - 5 метров. В конце июня были дополнительно оборудованы пункты



3 и 4 (Рис. 4). Зона разлома в местах расположения этих пунктов существенно расширяется, в связи с чем база датчиков в них была увеличена до 15 метров. Кроме датчиков деформаций в каждом из пунктов были установлены датчики температуры. Для устранения резких перепадов температуры штанговые датчики были накрыты полубочками и укрыты слоем рыхлого грунта.

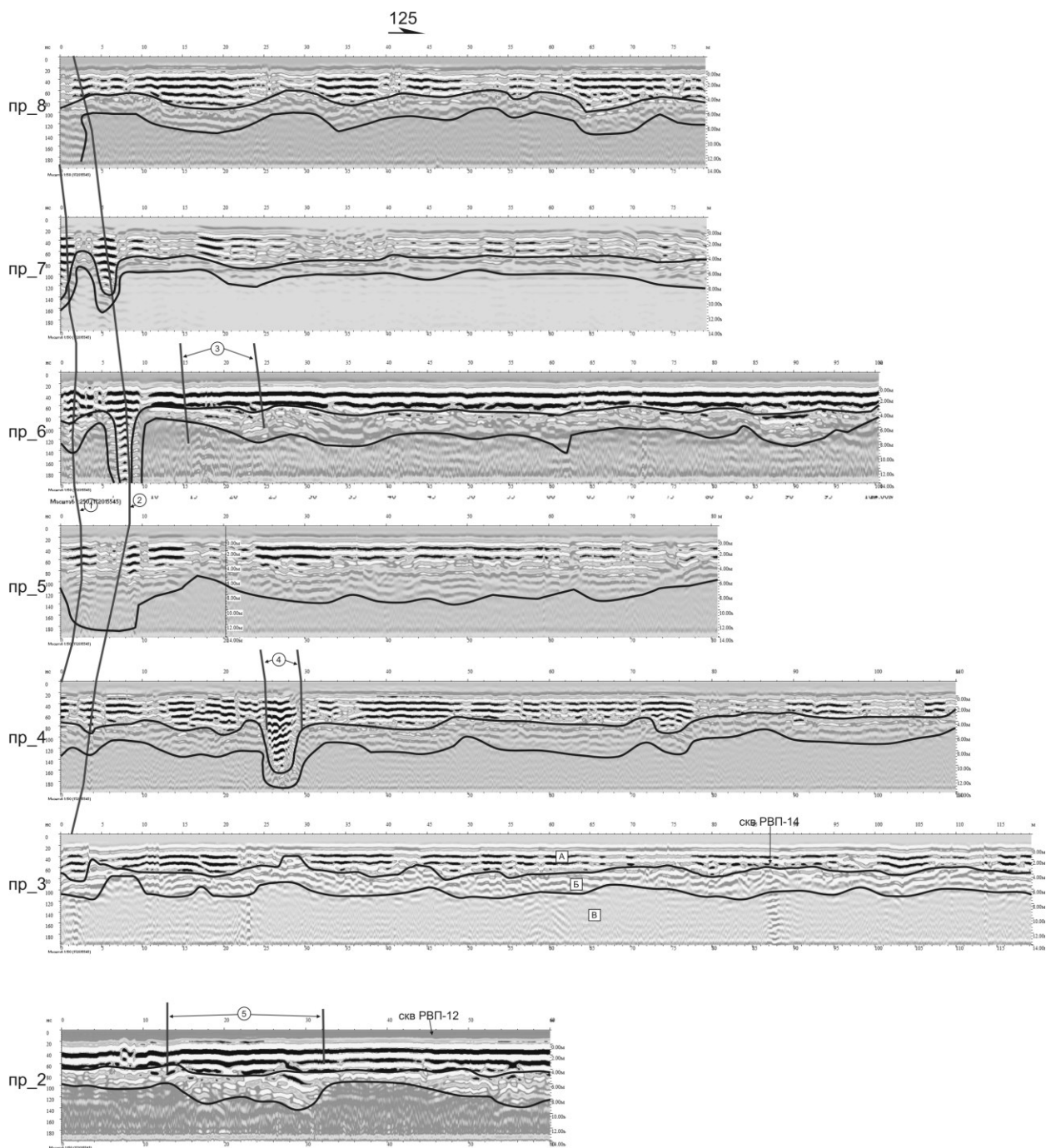


Рис. 3. Радарограммы полученные при помощи антенного блока АБ-90 на профилях №№ 2-8, заданных вкрест структуры проседания грунта борта карьера «Нюрбинский» в апреле 2014 г.

Обозначения на рисунке: А - техногенная насыпь; Б - песчаники рыжевато-бурые, глинистые (якутская свита юры); В - песчаники серые, алевритистые (сунтарская свита юры); 1-5 – зоны развития раскрытых трещин.

Долговременный мониторинг показал, что на сегментах разломных зон в пределах пунктов 1 и 2 проявляются незначительные деформации. Несколько месяцев в пункте 1 они составили от десятых долей миллиметра до 1.5 миллиметров, а в пункте 2, - десятые доли миллиметра. Соизмеримые деформации фиксировались в пункте 3 (Рис. 4).

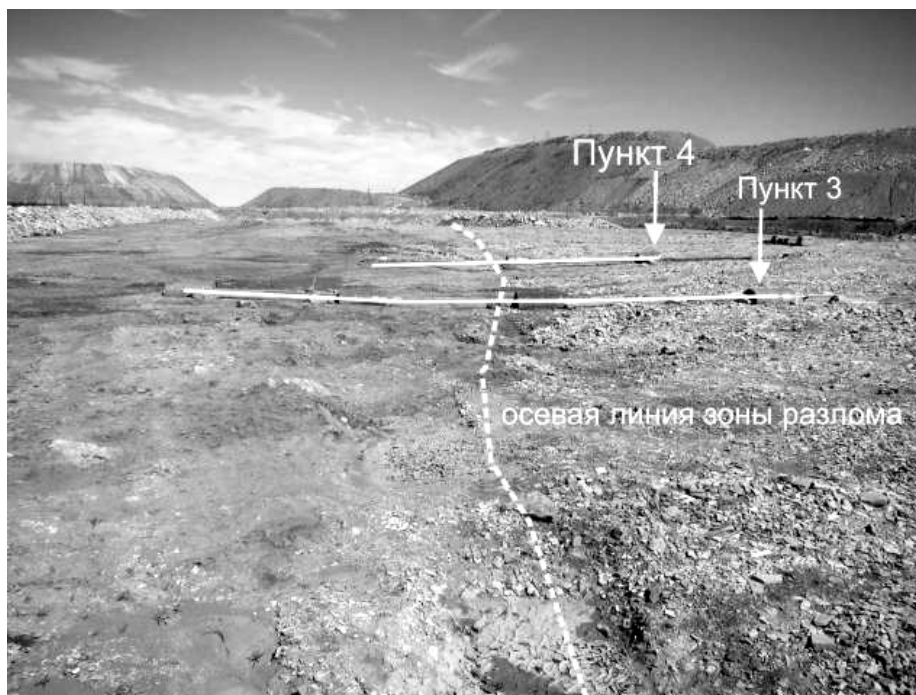


Рис. 4. Расположение штанговых датчиков в пунктах 3 и 4 вкrest простириания предполагаемой зоны разлома восточного борта карьера «Нюрбинский».

Сегмент зоны разлома в пункте 4 показал высокую деформационную активность за время мониторинга. На рисунке 5 показан обобщенный график деформаций, выраженных в миллиметрах. Из частных графиков видно, что деформационный процесс в зоне разлома на коротких временных интервалах развивается в режиме знакопеременных деформаций сжатия-растяжения. В долговременном интервале изменение деформаций подчиняется однонаправленному тренду растяжения (Рис. 5).

Накопленное приращение ширины зоны разлома за время наблюдений с апреля по ноябрь 2014 г. составило 13 мм, что по усредненной оценке соответствует скорости растяжения 3,55 мм в месяц или 42-43 мм в год. Средние помесечные скорости деформаций по всем пунктам мониторинга приведены в таблице 1.

Анализ данных годового мониторинга деформаций на малых базах показал, что разломно-блоковая структура восточного борта карьера в целом характеризуется активной деформационной динамикой. Идет устойчивое накопление деформаций на тестовых профилях, что говорит о постепенном крипповом смещении краевых блоков в сторону карьера. На это медленное смещение накладываются небольшие импульсные подвижки, от десятков микрон до первых миллиметров, инициированные промышленными взрывами в карьере.

Кроме того, осложняющее влияние с кратковременным быстрым увеличением деформаций оказывают близкие техногенные воздействия от работы тяжелой техники в пределах восточного борта. Не исключено, что на накопление деформаций влияют

лунно-солнечные приливы, отчетливо просматривающиеся в графиках первичных данных, однако специально этот вопрос не изучался.

Таблица 1

Средние скорости приращения деформаций растяжения (+) и сжатия (-) в пунктах мониторинга по месяцам в 2014 г.

Номер пункта	Среднее значение скорости (мм/мес)						
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
№1	+0.5	-0.35	-	+1,10	+0.21	+0.24	0
№2	-0.3	+0.4	-	+0.30	+0.10	-0.10	+0.12
№3	-	-	-	+2.24	+2.0	+2.1	+2.4
№4	-	-	-	-1.22	+3.33	+3.05	+3.05

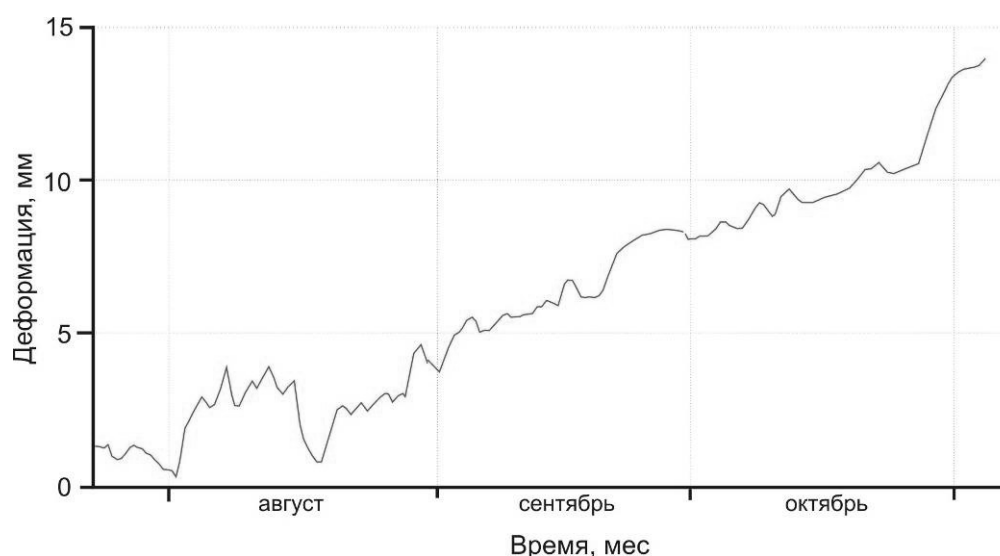


Рис. 5. Обобщенный график деформаций в пункте 4 за три месяца, карьер «Нюрбинский»

В целом, результаты выполненного деформационного мониторинга позволяют оценить текущее динамическое состояние разломно-блоковой системы восточного борта карьера как устойчивое. Рекомендуется в дальнейшем продолжить его инструментальный контроль в режиме реального времени, поскольку из теории катастроф известно, что катастрофические процессы в таких природных системах готовятся продолжительное время, а реализуются спонтанно и быстро.

Проведенные работы позволили сделать заключение о том, что охарактеризованный массив находится в состоянии предельного равновесия, имеющего потенциал к проявлению и нарастанию медленных пластических деформаций, течения в сторону карьера. Состояние массива нуждается в постоянном контроле и наращивании рядов баз данных по наблюдению за температурой и экзогеодинамической ситуацией участка, организацией дополнительных геотермических наблюдений, мониторинга процессов в пределах ослабленных зон трещиноватости. Наиболее действенной мерой в данной ситуации является стабилизация состояния массива путем промораживания в его наиболее нарушенной части и формирования таким образом контрфорса на пути сдвижения горных пород.

Таким образом, на примере карьера «Нюрбинский» авторами разработана методика наблюдения за деформационными процессами в горном массиве, а также их изучения при ведении горных работ в арктических условиях.

Анализ материалов, включающих ситуационные карты-схемы экзогеодинамического состояния борта карьера, температурный режим грунтов в зоне активных деформаций горного массива, расположение структурно-тектонических элементов, данные векторов смещения, литологическое строение массива и его геофизические характеристики, позволяет точно идентифицировать тип подвижек, направление и скорость развития процессов. Данные анализа предоставляют необходимые сведения для принятия управленческих решений, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации месторождения.

Возможная схема структурно-вещественной эволюции формирования коренных месторождений алмазов в Восточном секторе Арктической зоны РФ рассмотрена на примере одного из самых северных месторождений Якутской алмазоносной провинции – трубки «Комсомольская». Впервые разработанная структурно-вещественная модель трубки включает одновременно этапность развития структурно-тектонического пространства рудного узла и последовательность становления многофазной трубки.

По результатам картирования разрывных нарушений в пределах карьерного поля составлена схема разломно-блокового строения района локализации трубки «Комсомольская» (Рис. 6). Она свидетельствует о том, что кимберлитовое тело приурочено к сложно построенному узлу субвертикальных разрывных нарушений четырех направлений [1]. Наиболее крупным из них является субмеридиональный разлом, состоящий из нескольких субпараллельных разрывных нарушений. Кроме него, строение узла определяют разрывные нарушения трех направлений: восток-северо-восточного, субширотного и северо-западного.

Детальное изучение структурно-тектонического плана месторождения позволило восстановить поля тектонических напряжений и выявить их последовательность образования во времени. Установлено, что становление трубки «Комсомольская» осуществлялось на временном отрезке, характеризующемся субгоризонтальным положением действующих (максимальной и минимальной) осей главных нормальных напряжений, ориентированных в северо-восточном и северо-западном направлениях. Исходя из модели, формирование месторождения происходило в три этапа (Рис. 6).

В связи с необычными особенностями минералогии алмазов трубки «Комсомольская», авторами рассмотрены вопросы алмазоносности выделенных геолого-промышленных типов кимберлитов. Анализ эксплоразведочных и фабричных данных по алмазоносности кимберлитов с разных горизонтов месторождения показал, что кимберлитовая брекчия более продуктивна практически по всем ситовым классам. Примечательно, что в классе +4 алмазы из кимберлитовой брекчии имеют средний вес более чем в полтора раза превышающий таковой у кристаллов из автолитовой брекчии при меньшем среднем весе алмазов в классе -4+2. Подобная геологическая ситуация, когда заключительная кимберлитовая фаза в сложнопостроенной трубке относится к менее алмазоносной, чем предыдущая, является нетипичной. Для многих многофазных промышленных кимберлитовых тел Якутии характерно возрастание алмазоносности от первых к последним фазам кимберлитового расплава.

Рассмотренная структурно-вещественная эволюция формирования кимберлитовой трубки «Комсомольская» в целом позволила увязать наблюдаемые особенности расположения и кинематики разрывных нарушений с закономерностями геологического строения месторождения в рамках функционирования единой тектоно-динамической системы.



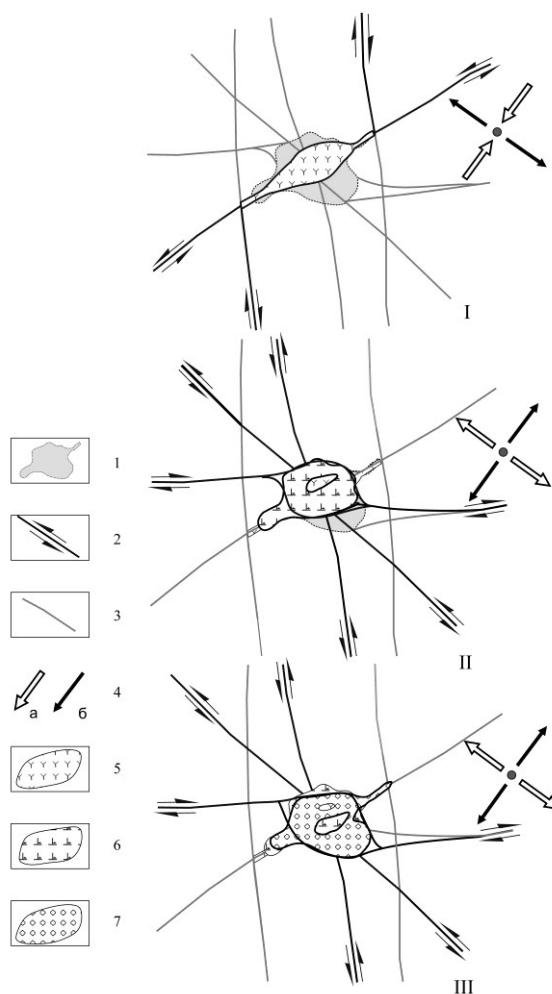


Рис. 6. Этапы вещественно-структурной эволюции кимберлитовой трубки «Комсомольская». Условные обозначения: 1 – современный контур трубки «Комсомольская», гор. +550 м; 2 – активизированные разломы и их динамика; 3 – пассивные разломы; 4 – направления полей напряжений: а – растяжение, б – сжатие; контуры геолого-промышленных типов кимберлитов: 5 – порфировых кимберлитов, 6 – кимберлитовых брекчий, 7 – автолитовых брекчий. I, II и III – первый, второй и третий этапы структурно-вещественной эволюции рудного тела.

Комплексный анализ вещественной и структурной составляющих в строении месторождения алмазов трубки «Комсомольская» имеет практическую значимость. Полученные результаты позволяют предложить в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля структурный образ аналогичного объекта поисковых работ - т.е. участка, в пределах которого возможна локализация кимберлитового тела типа трубки «Комсомольская». Это, прежде всего - узел пересечения региональных разломов субмеридионального, восток-северо-восточного, широтного и северо-западного направлений.

Также, впервые создана структурно-тектоническая модель формирования крупного месторождения алмазов трубки «Зарница». В пределах верхних горизонтов месторождения выделяется три разноориентированных поля тектонических напряжений. Северо-восточное и северо-западное направление векторов растяжения поля напряжений, связано с деформациями при формировании самой кимберлитовой

трубки, а субширотное – с региональными системами тектонической трещиноватости пород осадочного чехла.

Результаты выполненных исследований показывают, что в пределах рудного узла трубки «Зарница» выделяются системы блоков пород с изменяющейся степенью их трещинной нарушенности разнообразной ориентировки, протяженности, частоты распределения, времени формирования, тектонической активности и кинематического типа. Естественно, они характеризуются и неоднородным напряженным состоянием массива горных пород. По мере возрастания глубины карьера характер и интенсивность трещиноватости пород будет изменяться. Как правило, если на верхних горизонтах вмещающих осадочных толщ наблюдаются только отдельные зоны интенсивной трещиноватости, связанные с региональными разломами, то по мере углубления интенсивно проявляется и локальная трещиноватость, связанная с особенностями формирования кимберлитовых трубок и их дальнейшей эволюции. Фиксируемые трещинные зоны здесь более крупные и протяженные, по которым фиксируется миграция нефти, газа и воды.

На глубоких горизонтах отмечаются крупные зеркала скольжения практически по всему периметру трубки, причем последние наблюдаются не только в приконтактной зоне, но и в кимберлитах. Наибольшую опасность для устойчивости пород представляют зоны контакта кимберлитов с вмещающими породами [2]. Здесь часто развиты крупные, субвертикальные, хорошо проработанные зеркала скольжения с явными следами их активизации уже после внедрения трубок, часто со сбросовой кинематикой смещений. На таких участках горные работы нужно вести с особой осторожностью, поскольку возможны обвалы по уже существующим субвертикальным плоскостям скольжения даже через некоторое время после снятия горного давления.

Для устойчивости породных блоков наибольшую опасность представляют северо-западный, северо-восточный и юго-восточный и юго-западный фланги рудного поля (Рис. 7).

На этих участках необходимо проведение геомеханического мониторинга вблизи крупных трещин и зеркал скольжения с целью прогноза поведения плоскостей разрывов и зоны контакта кимберлитов во времени, особенно в период резких температурных колебаний и геомеханических напряжений.

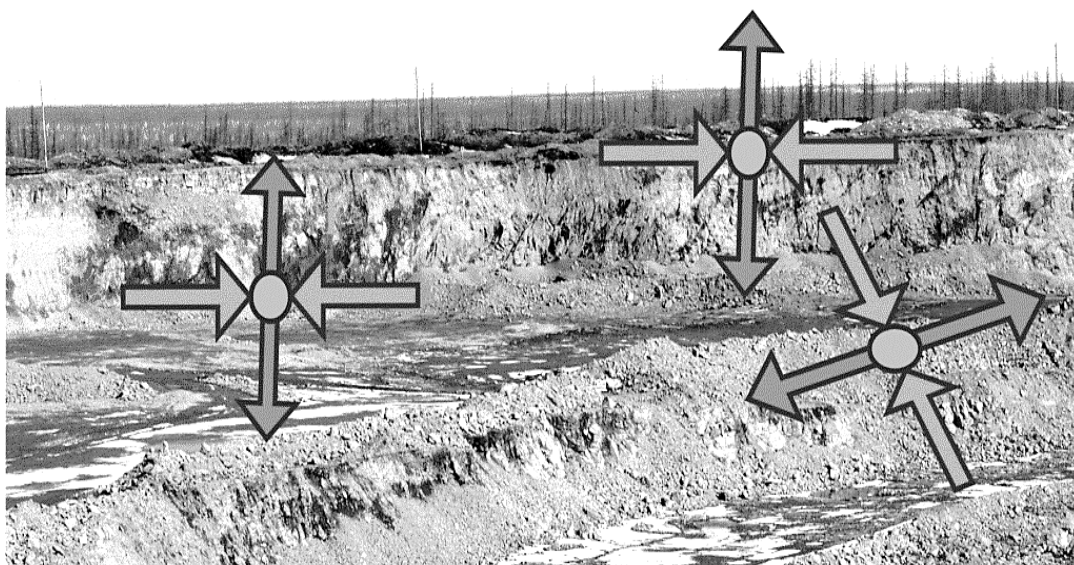


Рис. 7. Ориентировка главных осей сжатия (светло-серые) и растяжения (темно-серые) в западной части карьера трубки «Зарница».

Разрез месторождения насыщен газами, находящимися главным образом в свободном, сорбированном и растворенном состояниях. Газонасыщенность вмещающих среднекембрийских осадочных отложений сорбированными газами с глубиной возрастает и приобретает максимальные значения в интервалах среднего кембрия. Среднее содержание газовых компонентов, составляя  $0,2\text{--}0,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , нередко достигает  $1,8\text{--}3,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Общая газонасыщенность кимберлитов варьируется в широком диапазоне – от  $0,03$  до  $6,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Основным компонентом, особенно верхних интервалов трубки, представленных мерзлыми породами (до 250 м), является азот. Однако, доля метана в нижних разведанных горизонтах трубки может достигать 92 отн. %.

Газонасыщенность подземных вод в разрезе кембрийских отложений района трубки «Зарница» колеблется в значительных пределах. В составе верхнекембрийского водоносного комплекса диапазон изменений составляет  $0,05\text{--}0,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , увеличиваясь по мере роста пластовых давлений и наличия локальных экранов в толщах пород, приводящих к скоплению газов. Основными компонентами растворенных газов являются углеводороды, на долю которых приходится не менее 75 абс. %. Свободные выделения газов из кимберлитов трубки «Зарница» зарегистрированы в большинстве скважин при вскрытии трещинных зон мерзлого яруса пород на стадии разведки месторождения. При проходке большинства разведочных скважин происходили неоднократные выбросы газовой смеси с ее возгоранием. При отработке рудных блоков в добычных забоях, главным образом, по разрывным нарушениям будет происходить миграция свободных газов, формироваться значительные притоки рассолов, содержащие растворенные взрывоопасные газы. Перехват газонасыщенных подземных вод путем создания локальных депрессий будет способствовать снижению газонасыщенности рабочего пространства горных выработок.

Помимо вышеописанных работ проведена оценка прочностных показателей кимберлитов и вмещающих осадочных отложений, а также структурно-тектонического строения карьерного поля месторождения трубки «Удачная». Специфика данного месторождения, заключается в ее генетических, структурно-тектонических, криогидрогеологических и нефтегазоносных особенностях, а именно, в низкой устойчивости блоков пород в приконтактных частях месторождения, структурообразующих зонах нарушений, межтрубном пространстве, различной степени обводненности породных блоков и других, не менее важных деталях его строения и показателей свойств. Особенностью вскрываемых подкарьерных интервалов месторождения является наличие опасных зон, обусловленных геомеханическими, гидрогеодинамическими, газодинамическими факторами. При рассмотрении глубоких горизонтов месторождения количество разнопрочностных блоков и интервалов, зависящих от тектонических нарушений по приконтактным и структурообразующим зонам, значительно увеличивается.

Для расчета устойчивости уступов и бортов карьера были определены следующие показатели физико-механических свойств пород: объемная плотность, сцепление и угол внутреннего трения. Последние две величины характеризуют свойства горных пород не в образце, а в массиве, поэтому требуют проведения натурных испытаний. Натурные испытания прочностных свойств вмещающих пород в карьере трубки «Удачная» проводились в откосах уступов, которые при разработке месторождения подвергаются техногенному (буровзрывному) воздействию. Установлено, что диапазон изменений коэффициента структурного ослабления для пород трубки «Удачная» достаточно широк - от  $0,03$  до  $0,36$ . Присутствие разнопрочных блоков и участков карьерного поля, зависящих от многих природно-технологических факторов, приобретает особый характер и значимость для создания безопасных условий ведения подземных горных работ.

На крупнейшем месторождении алмазов - трубке «Удачная» - выполнена оценка состояния природно-техногенной гидрогеологической системы в контуре карьерного поля. Установлено, что поступление соленых вод и слабых рассолов в карьер трубки Удачная началось в 1983 г. при положении дна карьера +110 м. абс. Минерализация дренажных вод тогда составляла 25-40 г/дм<sup>3</sup>. До 1993 г. средняя величина водопритока изменялась от 40 до 60 м<sup>3</sup>/ч (Рис. 8).

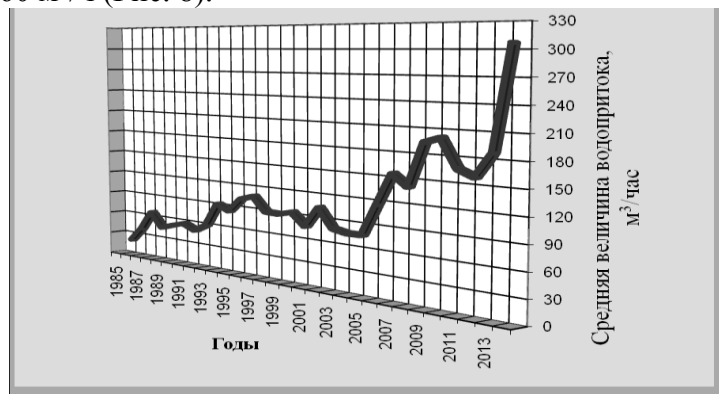


Рис. 8. Динамика водопритока в карьер трубки «Удачная» (по данным Удачинского ГОКа АК «АЛРОСА»).

В настоящее время глубина карьера достигла 640 м (-326 м. абс.). Минерализация откачиваемых рассолов возросла до 350-380 г/дм<sup>3</sup>. Средняя величина суммарного водопритока в карьер превысила 300 м<sup>3</sup>/ч.

Дренажные воды представлены главным образом крепкими и весьма крепкими рассолами. Среди анионов основное место (до 99%) принадлежит хлору. Очень мало содержание сульфат- и гидрокарбонат-ионов - не > 0.1-0.2 г/дм<sup>3</sup>. Катионы представлены четырьмя элементами: Ca<sup>2+</sup> (40-60 %-экв.), Mg<sup>2+</sup> (20-40 %-экв.), Na<sup>+</sup> (15-20 %-экв.) и K<sup>+</sup> (5-10 %-экв.). Бром (до 4 г/дм<sup>3</sup>) присутствует во всех пробах, другие микрокомпоненты (Sr<sup>2+</sup>, Li<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>) имеют довольно существенные концентрации.

Одной из отличительных особенностей дренажных рассолов является способность сохранять жидкое и, следовательно, активное состояние при отрицательной температуре (до -50 °С). Поэтому вне зависимости от сезонов года напорная разгрузка подземных вод в бортах карьера по зонам тектонических нарушений приводит к активизации фильтрационно-суффозионного выноса заполнителя трещин, эрозии и деформации уступов. Развитие этих процессов также стимулируют буровзрывные работы, проводящиеся в карьере.

За период проведения горных работ в карьере трубки «Удачная» (с 1983 по 2014 гг.) общий объем откачанных дренажных вод превысил 27 млн. м<sup>3</sup> (рис. 9).

Длительное осушение месторождения обусловило рост минерализации дренажных вод, формирование мощной депрессионной воронки и сработку запасов рассолоносных зон. В настоящее время химический состав дренажных вод — хлоридный кальциевый — постоянен во времени, что характерно для гидрогеохимического разреза Оленекского криоартезианского бассейна.

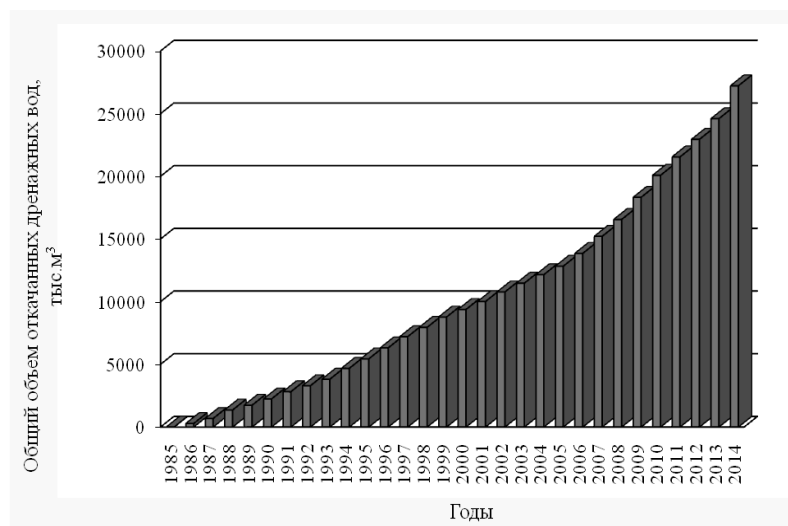


Рис. 9. Динамика откачанных дренажных вод карьера трубки «Удачная» (по данным Удачинского ГОКа АК «АЛРОСА»).

Начиная с 1986 г., борьба с водоприток в карьер проводится по схеме «осушение-захоронение». Для осушения карьера применяется открытый водоотлив. До 2013 г. захоронение дренажных вод осуществлялось в скважины на Октябрьском и Киенгском полигонах, пробуренные в мерзлых осадочных толщах до интервала глубин 150-280 м ниже местных базисов эрозии.

В основу метода изоляции рассолов положена способность высокоминерализованных вод плавить текстурообразующие льды в горных породах в широком диапазоне отрицательных температур. Полезная емкость мерзлых массивов на полигонах была обусловлена: 1) высвобождением дополнительного объема (на 9 %) при плавлении льда рассолами в трещинах и кавернах; 2) наличием мощной зоны тектонического дробления горных пород, открытых вертикальных и субвертикальных трещин шириной 10-15 см, безльדיстых кавернозных и пористых поглощающих коллекторов с потенциально высокими фильтрационными свойствами; 3) присутствием в подземных льдах большого количества (до 5-10% от объема) газовых включений. Мощность проницаемых пластов и блоков пород изменялась от 10-20 см до 10-20 м.

Распределение техногенных водоносных горизонтов в верхней части геологического разреза имело временный характер, с тенденцией их постепенного погружения в нижележащие пласты. Пути для нисходящей миграции служили не только литологически проницаемые окна и зоны тектонической трещиноватости, но и многочисленные наблюдательные скважины, также предназначенные для дегазации массива захоронения.

Благодаря наличию оптимальных структурно-тектонических особенностей полигонов за 27 лет эксплуатации системы захоронения в мерзлые толщи сброшено 22.5 млн. м<sup>3</sup> рассолов.

С июня 2013 г. захоронение шахтных и дренажных вод рудника «Удачный» в многолетнемерзлых породах производится на участке «Левобережный». К январю 2015 г. в толщу мерзлоты закачано 3065 тыс. м<sup>3</sup> техногенных вод. В околоскважинном пространстве при захоронении рассолов в настоящее время происходит плавление текстурообразующих льдов в горных породах и плотностная дифференциация жидкой фазы в стволах эксплуатационных скважин. В целом, состав рассолов в прискважинной зоне - хлоридный магниевый-кальциевый – идентичен составу сбрасываемых в мерзлый массив крепких рассолов и постоянен во времени [3].



Таким образом, анализируя вышеизложенный материал, можно считать, что создание многокомпонентной модели коренного месторождения алмазов и его эволюции в геологической истории является новым качественным подходом к решению научно-методических, проектных и практических задач совершенствования и интенсификации открытых и подземных горных работ предполагаемых коренных месторождений в восточном секторе Арктической зоны РФ, а также на работающих рудниках АК «АЛРОСА». Построение адекватных моделей горно-геологических объектов, использование комплекса мониторинговых наблюдений деформационных явлений во вмещающем горном массиве и на конструктивных элементах карьеров позволят наиболее полно выявить объективные характеристики как месторождений, так и способа их разработки. Созданные модели месторождений отражают фактическое состояние горных работ, распределение алмазов в пространстве рудного тела, физико-механические характеристики кимберлитов и вмещающих горных пород и являются основой для всех дальнейших проектных разработок и технико-экономических расчетов.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» (координатор Программы академик А.И. Ханчук).

Проект «Создание научных основ безопасных и эффективных технологий эксплуатации коренных месторождений алмазов в сложных горно-геологических условиях Восточного сектора Арктики» (руководитель чл.-корр. РАН Е.В. Скляр).

#### Список литературы:

1. К.Н. Егоров, Д.А. Кошкарев, А.С. Гладков. *Отечественная геология*, 2014, **6**, 51-59.
2. А.В. Дроздов, К.Н. Егоров, А.И. Мельников. *Руды и металлы*. 2014, **4**, 73-79.
3. С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев. *Промышленные рассолы Сибирской платформы (гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация)*. Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2014, 162 с.