Геология
Geology

УДК 622.243.23

РЕЗУЛЬТАТЫ БУРЕНИЯ СКВАЖИНЫ 5Г НА РОССИЙСКОЙ СТАНЦИИ «ВОСТОК» И ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНОВ ЛЬДА

Н.И.ВАСИЛЬЕВ, *д-р техн. наук, старший научный сотрудник, vasilev_n@mail.ru*
А.Н.ДМИТРИЕВ, *канд. техн. наук, доцент, 1234567890nika@vail.ru*
Санкт-Петербургский горный университет, Россия
В.Я.ЛИПЕНКОВ, *канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, lipenkov@aari.ru*
Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

Приводятся сведения о результатах и особенностях бурения глубокой скважины 5Г в ледниковом массиве на российской станции «Восток». Установлены основные закономерности изменения по глубине структурных и физических свойств антарктического ледникового покрова, определяющих механические и реологические свойства ледяной породы, которые влияют на проходку скважины и поддержание ее в рабочем состоянии, создание безопасных и конкурентоспособных технологий бурения мощных ледовых толщ и экологически безопасной технологии вскрытия подледниковых водоемов. Приводятся результаты исследований кернов льда и построения палеоклиматических рядов, реконструированных по результатам изучения ледяного керна со станции «Восток», сопоставленные со сводной изотопной кривой, характеризующей колебания уровня Мирового океана.

Ключевые слова: Антарктида, бурение, дополнительный ствол, ледниковый массив, керн, лед, озеро, скважина.

Введение. В эпоху нарастающего антропогенного воздействия на климат Земли особую актуальность приобретают исследования, направленные на восстановление истории глобальных и региональных изменений природной среды нашей планеты. Реконструкция и анализ временных рядов, характеризующих состояние и состав атмосферы, гидросферы и криосферы Земли в прошлом, позволяют вскрыть причинно-следственные связи и определить механизмы современных климатических изменений, которые могут оказывать существенное воздействие на хозяйственную деятельность и жизнь человека. Уникальными природными архивами палеоклиматических данных являются отложения атмосферного льда, слагающие ледниковые щиты Антарктиды и Гренландии. Керны древнего льда, добываемые при колонковом бурении глубоких скважин в современных ледниковых покровах, содержат наиболее полную информацию о колебаниях температуры воздуха, газового состава атмосферы, степени ее запыленности и изменениях циркуляционного режима в масштабах времени от десятков до сотен тысяч лет.

Бурение льда можно выполнять двумя способами: тепловым и механическим. При тепловом способе лед на забое плавится под воздействием нагреваемой коронки, при механическом – за счет разрушения льда коронками резцового типа. Бурение глубоких скважин на станции «Восток» в Антарктиде ведется с 1970 г. До 1993 г. применялись, в основном, термобуровые снаряды, при разработке и использовании которых наши ученые добились

значительных успехов [3, 4, 9]. Одной из целей такого бурения было получение керна подледниковых пород, что потребовало перехода на бурение механическим способом.

В 1993 г. в сезон 39-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) буровой комплекс на станции «Восток» переоборудовали для продолжения буровых работ с использованием электромеханического бурового снаряда [15, 20]. Механический способ бурения скважин во льду выгодно отличается от теплового способа значительно меньшим энергопотреблением, более высокой скоростью бурения и значительно лучшим качеством получаемого керна. В настоящее время для бурения глубоких скважин во льду используются только механические буровые снаряды [8-11, 14, 17]. Изменение конечной задачи буровых работ в связи с открытием озера Восток [7, 21], в воду которого должна была войти скважина, а также значительные изменения физико-механических свойств льда на глубинах свыше 3000 м потребовали внесения серьезных изменений в технологию работ и планы их проведения [16, 19, 20].

Особенности строения ледника в районе станции «Восток». Наиболее общей особенностью большинства физических и структурных характеристик льда, слагающего антарктический ледниковый покров в районе озера Восток, является их эволюционное изменение в процессе уплотнения и динамометаморфизма слоев ледяной породы. Вместе с тем проведенные исследования показали, что вариации многих структурных характеристик по глубине связаны с климатическими колебаниями, происходившими на поверхности ледника в прошлом [4, 5, 13].

В основе рассмотрения метаморфизма ледяной породы лежит термодинамический принцип стремления системы к минимуму свободной энергии, который в случае минеральных агрегатов выражается в стремлении к уменьшению удельной площади границ кристаллических индивидов (зерен). Наиболее яркое представление о размахе структурных преобразований, происходящих в толще антарктического ледника, дает вертикальный профиль размеров зерен льда (рис.1). Как следует из представленных здесь данных, средний размер зерен в интервале глубин 20-3450 м увеличился за 600 тыс. лет (оценочный возраст породы на глубине 3450 м) примерно в 100 раз: от 1 до 100 мм в диаметре.

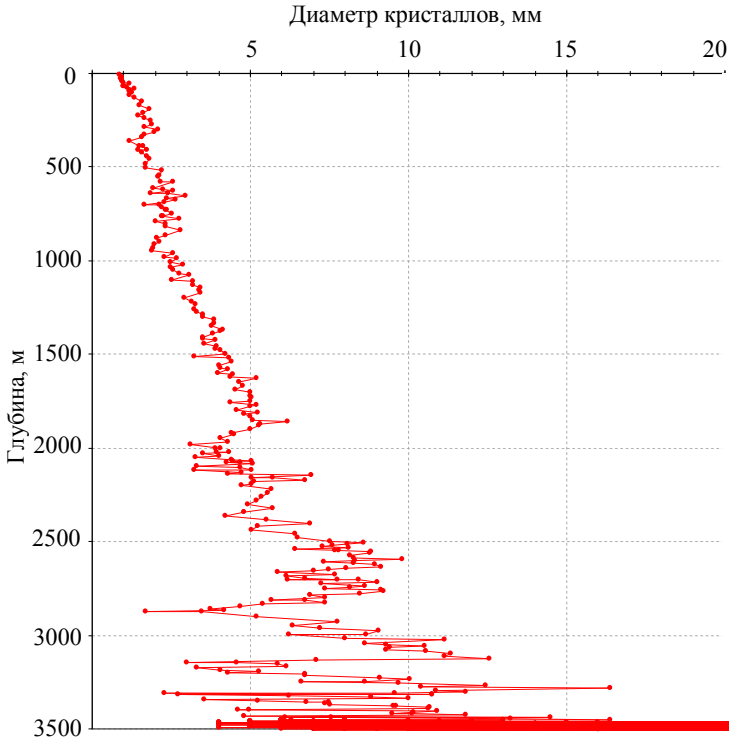


Рис.1. Изменение размера зерен льда с глубиной [4]

Вместе с тем на фоне общей тенденции к увеличению размеров кристаллов льда с глубиной наблюдаются колебания, которые обнаруживают отчетливую корреляцию с изменением изотопного состава льда и концентрации в нем аэрозольных примесей. Как видно из рис.1, основная толща ледника до глубины 3000 м сложена из кристаллов, размеры которых не превышают 5 мм, что дает основание считать лед в этом диапазоне изотропным телом.

Скважина 5Г. Бурение глубокой скважины 5Г на станции «Восток» было начато в 1990 г. в период работы 35-й Советской антарктической экспедиции тепловым способом снарядами типа

ТЭЛГА и ТБЗС [2, 3]. В 1992 г. в период работы 38-й РАЭ скважина достигла глубины 2755 м.

В период 40-й РАЭ (1995) бурение скважины 5Г-1 было продолжено с глубины 2755 м электромеханическим снарядом [1, 6, 15, 20] и без каких-либо серьезных осложнений доведено до глубины 3109 м. Затем, в сезонные периоды 41-, 42- и 43-й РАЭ (1995/96, 1996/97 и 1997/98), скважина 5Г-1 была пройдена в интервале глубин от 3109 до 3623 м. После сезонных работ в 1998 г. бурение скважины было приостановлено на восемь лет и возобновлено лишь в сезоне 51-й РАЭ в январе 2005 г., когда скважина достигла глубины 3650 м. Несмотря на значительное время простоя, деформаций стенок скважины не было отмечено, благодаря практически полной компенсации горного давления льда давлением столба заливочной жидкости по всему стволу скважины. При продолжении буровых работ в 52-й РАЭ из-за допущенных ошибок на глубине 3666 м произошла авария, в результате которой снаряд был оставлен на забое. В сезоне 54-й РАЭ (январь 2009) после неудачных попыток извлечь заклиненный снаряд на глубине 3600 м было выполнено отклонение от аварийного ствола и образован новый ствол скважины 5Г-2.

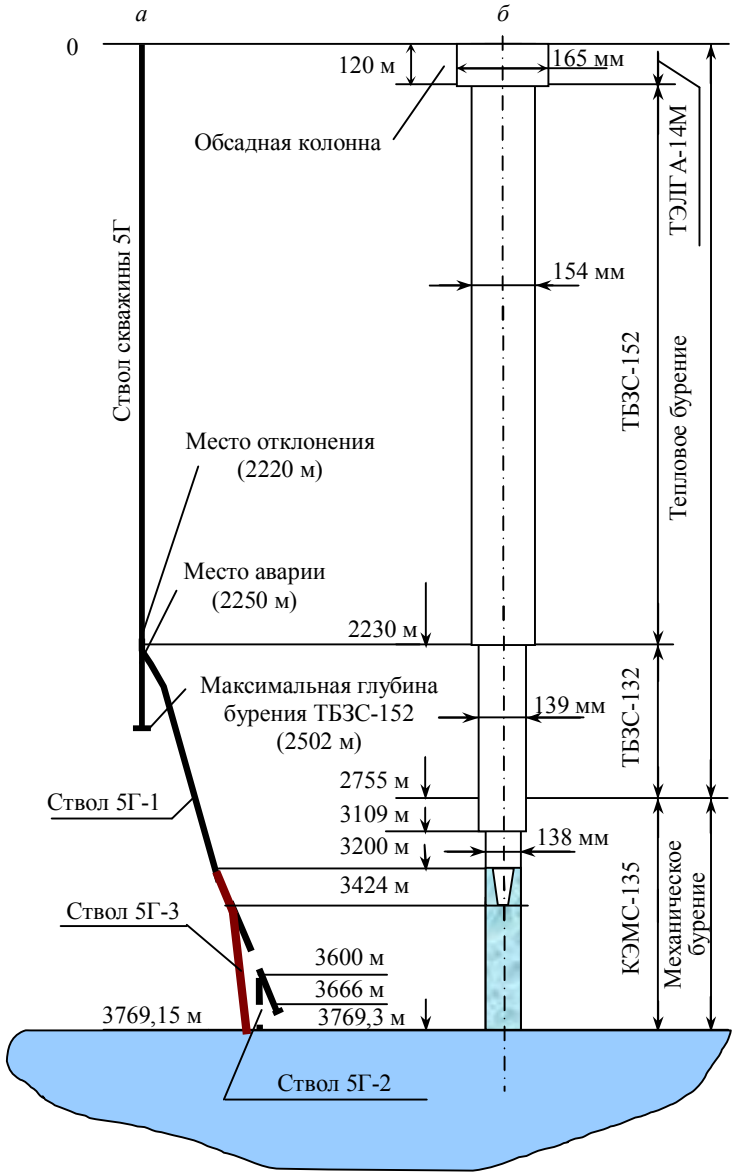


Рис.2. Глубокая скважина 5Г на станции «Восток» в Антарктиде: *а* – схема скважины; *б* – конструкция скважины

В сезон 55-й РАЭ скважина 5Г-2 достигла глубины 3650 м, в сезон 56-й РАЭ – 3720 м, а в период 57-й РАЭ 5 февраля 2012 г. было впервые вскрыто подледниковое озеро Восток на глубине 3769,3 м. Вода поднялась в скважину и остановилась на глубине примерно 3200 м (по керну).

В настоящее время глубокая скважина на станции «Восток» представляет собой сложную многоступенчатую конструкцию (рис.2). В ее верхней части установлена обсадная колонна до глубины 120 м с внутренним диаметром 165 мм.

До глубины 2502 м проходка скважины осуществлялась термобуром ТБЗС-152 при минимальном диаметре скважины 153 мм. При очередном подъеме на глубине 2250 м снаряд заклинило в скважине. Кабель был оторван от места заделки в снаряде, после чего на глубине 2200 м было выполнено отклонение и начато бурение нового ствола скважины 5Г-1 термобуровым снарядом ТБЗС-132 с наружным диаметром коронки 132 мм.

Первоначально в диапазоне глубин от 2200 до 2755 м скважина, пробуренная термобуровым снарядом ТБЗС-132, имела минимальный диаметр 133 мм. Перед началом бурения механическим способом этот участок скважины был расширен до диаметра 139 мм. В процессе дальнейшего бурения механическим способом пройденные участки скважины периодически расширялись, в результате чего скважина приобрела ступенчатую форму.

Общий объем заливочной жидкости (смесь авиационного топлива ТС-1 и фреона F-141b), находящейся в скважине, составляет около 60 м^3. Уровень заливочной жидкости на 20 июля 2012 г. находился на глубине 42 м, ее средняя плотность равнялась 910 кг/м^3. До глубины 2200 м скважина практически вертикальна, затем угол отклонения оси скважины от вертикали изменяется от 6 до 8°.

Обсадная колонна. В верхней части скважины установлена обсадная колонна из пластиковых труб, аналогичная обсадным колоннам, применявшимся при бурении в Гренландии и на Куполе С в Антарктиде [22]. Проект установки обсадной колонны был разработан и осуществлен совместно с французской Лабораторией гляциологии и геофизики окружающей среды (LGGE). Обсадная колонна установлена перед переходом на механическое бурение при глубине скважины 2755 м.

На нижнем конце колонны закреплен алюминиевый башмак, который нагревался при постановке колонны на уступ. После бурения 0,5 м нагрев башмака был прекращен и нижняя часть колонны оказалась вмороженной в лед. С целью получения воды для пробки соосно с нижней секцией трубы был закреплен кожух. В зазоре между кожухом и наружной поверхностью трубы была заморожено около 30 л воды. После размораживания вода вылилась в затрубное пространство, и после ее повторного замерзания нижняя секция обсадной оказалась вморожена на высоту от 2 до 3 м.

Вмораживание нижней секции обсадной трубы гарантировало изоляцию проницаемого снежно-фирнового слоя от скважины и снижение риска его загрязнения заливочной жидкостью.

Особенности бурения скважины 5Г механическим способом. При бурении скважин во льду, как в Антарктиде, так и в Гренландии, российскими и иностранными специалистами, начиная с глубины 2500 м, отмечается постепенное снижение рейсовой проходки, а с глубины 3000 м проблемы в поддержании стабильного процесса бурения становятся столь значительными, что бурение может быть просто прекращено. Это явление даже получило название – «проблема бурения теплого льда», так как с увеличением глубины температура льда повышается.

Анализ результатов бурения скважины 5Г [20] показал, что основная причина возникающих в процессе бурения проблем связана с изменением кристаллической структуры ледника [6, 16]. Все участки скважины, где отмечались проблемы в бурении, соответствуют интервалам керна, сложенного относительно крупнокристаллическим льдом. Устанавливается четкая корреляция между проходкой за рейс и размерами кристаллов (рис.3).

Кроме того, с ростом глубины возрастает температура льда, что усугубляет проблемы при бурении. На глубинах, начиная с 2500 м, происходит изменение физико-механических свойств антарктического льда, размеры кристаллов льда постепенно увеличиваются, превышая ширину забоя. С глубины 3000 м средние размеры кристаллов превышают 20 мм, ниже глубины 3500 м отдельные кристаллы имеют размеры более 1000 мм. В результате при бурении ряд полученных кернов состоял из 1-2 монокристаллов. На глубинах свыше 3000 м температура льда близка к точке фазового перехода, в результате чего мелкодисперсные частицы шлама, обладающие большой свободной поверхностью, слипаются. Причина появления воды на поверхности – нагрев при трении частиц друг об друга в потоке промывочной жидкости, что приводит к образованию шламовых пробок и прекращению углубки.

Справиться с этими осложнениями удалось благодаря внесению значительных изменений в конструкцию фильтра шламосборника и буровой коронки [6], что позволило стабилизировать процесс бурения и 5 февраля 2012 г. успешно осуществить вскрытие озера Восток.

После замерзания поднявшейся в скважину воды в сезоне 58-й РАЭ (декабрь 2012 – январь 2013) было начато повторное бурение скважины 5Г, которое завершилось в январе 2015 г. повторным вскрытием озера Восток.

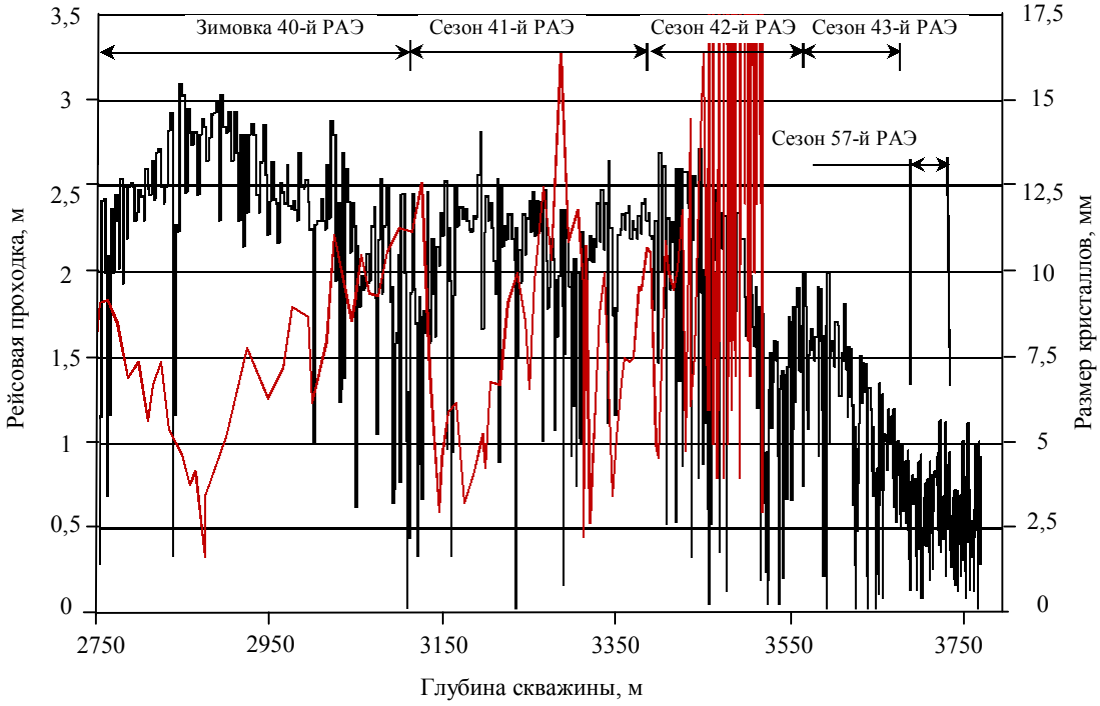


Рис.3. Результаты бурения скважины 5Г-1 механическим способом

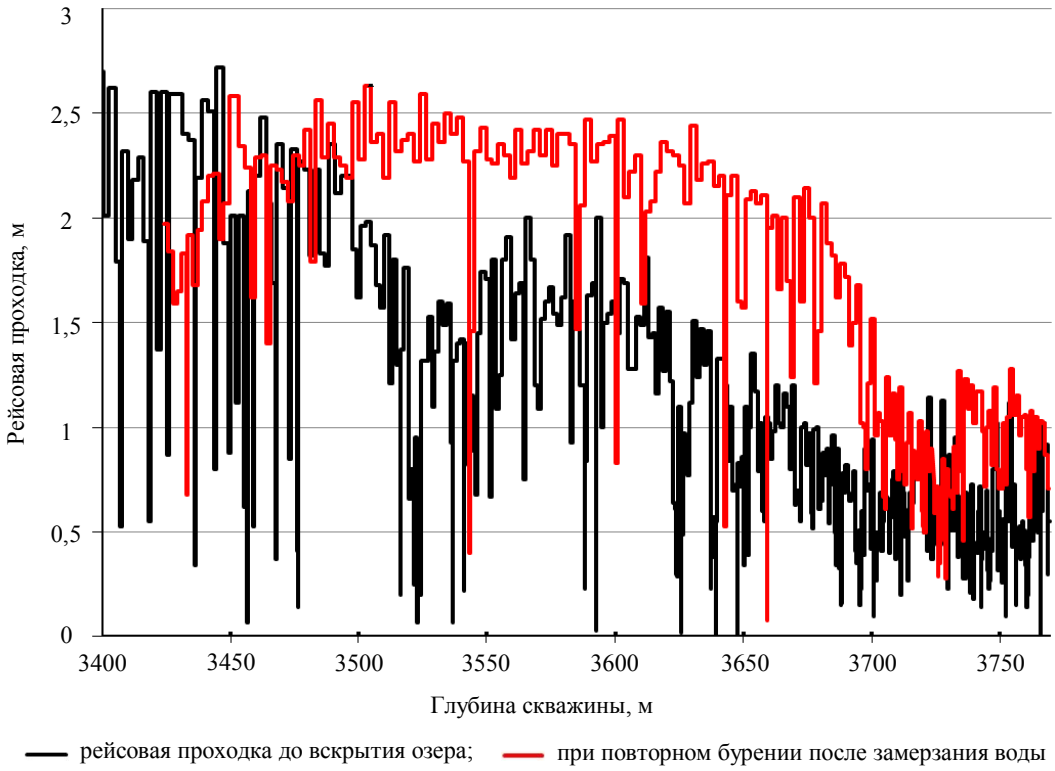


Рис.4. Диаграммы рейсовой проходки стволов скважины 5Г-1, 5Г-2 и 5Г-3

В начале буровых работ выяснилось, что вода сначала поднялась до глубины 3200 м, а затем быстро опустилась до глубины 3424 м. В этом интервале глубин на стенках скважины образовался слой льда, постепенно увеличивавшийся с глубиной. Бурение выполнялось буровым снарядом, модифицированным перед вскрытием подледникового озера. Диаграмма рейсовой проходки (рис.4) наглядно показывает эффективность принятых мер.

Процесс бурения протекал стабильно при производительности в 2-2,5 раза большей, чем это было при бурении до вскрытия подледникового озера. С глубины 3650 м рейсовая проходка снова стала стабильно уменьшаться, а с глубины 3700 м ее среднее значение стало близко к 1 м. В этом диапазоне глубин тенденция к снижению рейсовой проходки с увеличением глубины осталась такой же, как и перед вскрытием подледникового озера, но существенно повысилась стабильность процесса бурения и увеличилась его производительность. Снижение рейсовой проходки в этом диапазоне связано в первую очередь с недостаточной мощностью штатного двигателя бурового снаряда, в связи с чем не было возможности повысить расход заливочной жидкости в циркуляционной системе.

Использование полученных кернов ледникового льда для реконструкции прошлых изменений климата. Фундаментальное значение для изучения климата нашей планеты имеют охватывающие последние 440 тыс. лет палеоклиматические ряды, которые были реконструированы по результатам изучения ледяных кернов, полученных на станции «Восток» с использованием разработанной нами технологии (рис.5). Они свидетельствуют

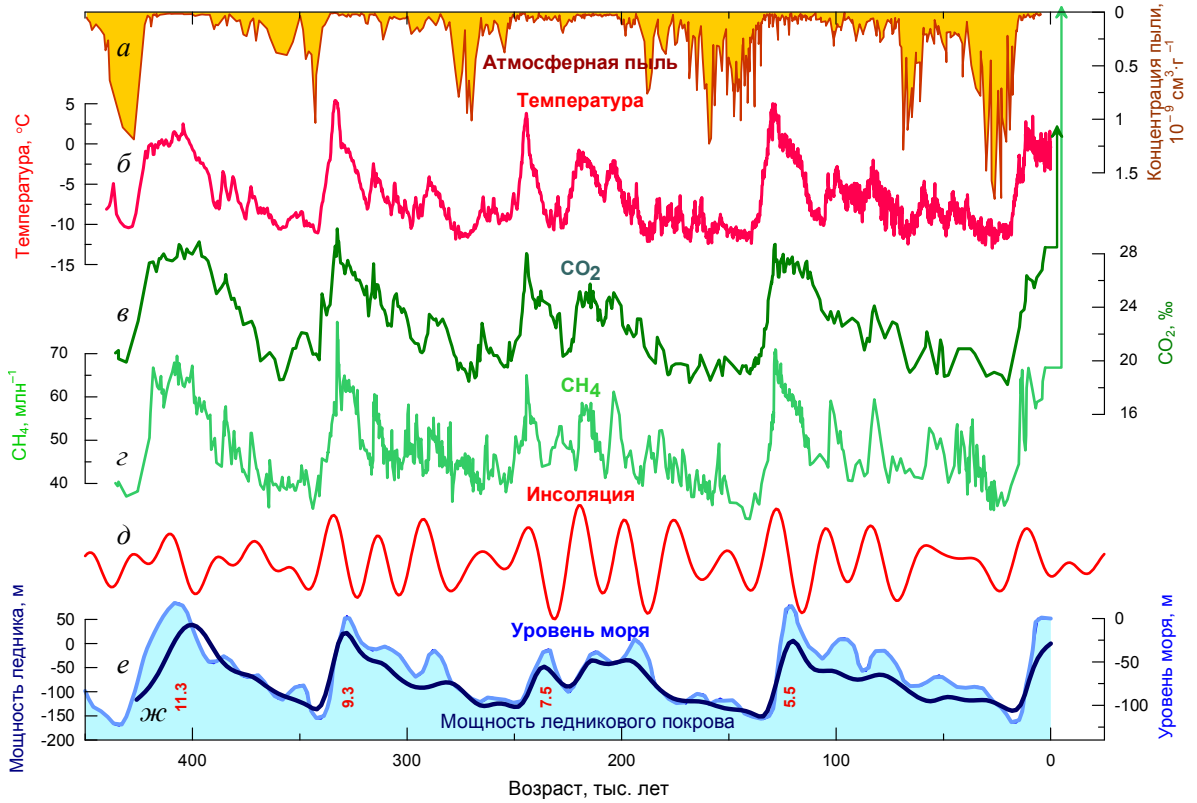


Рис.5. Палеоклиматические ряды, реконструированные по результатам изучения ледяного керна со станции «Восток», сопоставленные со сводной изотопной кривой, характеризующей колебания уровня Мирового океана и кривой июньской инсоляции на 65° с.ш. по данным работ [5, 12, 18]: *а* – объемная концентрация микрочастиц атмосферного аэрозоля во льду; *б* – отклонение температуры воздуха на поверхности ледника в прошлом от современной температуры; *в* – объемная концентрация двуокиси углерода CO_2 в атмосферном воздухе; *г* – объемная концентрация метана CH_4 в атмосферном воздухе; *д* – инсоляция в середине июня, рассчитанная для параллели 65° с.ш. (условные единицы, шкала не показана); *е* – сводная изотопная кривая по морским колонкам, пересчитанная в изменения уровня Мирового океана относительно его современного состояния; *ж* – изменение мощности антарктического ледникового покрова относительно его современного уровня

о том, что в течение указанного периода времени характеристики климата и газового состава атмосферы Земли испытывали весьма значительные колебания.

Спектральный анализ рядов позволил установить, что значительная доля естественных климатических колебаний связана с циклическими изменениями прецессии равноденствий, наклона оси Земли и эксцентриситета ее орбиты.

Наиболее существенный вклад в глобальные изменения природной среды вносили колебания с периодом порядка 100 тыс. лет (соответствуют циклу изменения эксцентриситета земной орбиты). Они определяли ледниковые и межледниковые периоды на нашей планете. Исследования выявили тесную связь между глобальными изменениями климата и концентрацией двуокиси углерода (CO_2) и метана (CH_4) в атмосфере Земли. Благодаря изучению ледяных кернов озера Восток эта связь была впервые прослежена на протяжении четырех больших (100-тысячелетних) климатических циклов. Последнее стало неопровержимым экспериментальным доказательством роли парниковых газов как усилителей первоначально слабых климатических изменений, вызванных циклическими колебаниями орбитальных параметров планеты и связанными с ними изменениями количества солнечной энергии, которую получает земная поверхность на разных широтах в разные сезоны года.

Реконструкции, выполненные на основе результатов изотопных и газовых анализов антарктического льда, указывают на то, что рост концентрации CO_2 в атмосфере в прошлом начинался только спустя несколько сотен лет после начала потепления в Антарктиде. Такая последовательность событий кардинально отличается от той, которая наблюдается в наше время, когда рост содержания парниковых газов в атмосфере, вызванный производственной деятельностью человека, инициирует глобальное потепление. Тем не менее, фазовые соотношения между естественными вариациями температуры и парниковых газов в прошлом, установленные по данным ледяных кернов, дают представление о времени, необходимом для восстановления углеродного равновесия в системе атмосфера – океан – биосфера.

Исследования керна со станции «Восток» помогли осознать, что мы живем в достаточно уникальное – с точки зрения истории глобальных климатических изменений – теплое время одной из межледниковых фаз, которые наступают на Земле примерно через каждые 100 тыс. лет. Продолжительность последнего межледниковья, которое ученые называют голоценом и которое длится уже около 11 тыс. лет, заметно больше, чем трех предшествующих межледниковых периодов, длительность которых не превышала 4-6 тыс. лет (рис.5) Вполне возможно, что именно такой длинный период относительно стабильного и теплого климата был необходим, чтобы на нашей планете возникли современные цивилизации, которые вряд ли смогли бы достигнуть своего сегодняшнего высокого уровня развития за более короткий срок. Правильное понимание современных климатических тенденций невозможно без ответа на вопросы: «Почему наше межледниковье такое длинное? Когда оно может закончиться при естественном ходе событий, без активного воздействия человечества на климат планеты?».

Важным достижением проекта бурения на станции «Восток» стала реконструкция климата и газового состава атмосферы во время древнего межледникового периода, который переживала наша планета 410 тыс. лет назад и который хорошо известен палеоклиматологам всего мира под названием «морская изотопная стадия 11» (МИС 11). Это единственный – из четырех полностью зарегистрированных в керне станции «Восток» – межледниковый период (397-425 тыс. лет назад), который был таким же теплым и таким же продолжительным, как наш голоцен. Есть все основания рассматривать МИС 11 как уникальную 28-тысячелетнюю эпоху в истории Земли, изучение которой может дать ключ к пониманию современного климата.

Первая особенность МИС 11 заключается в том, что, как показывают результаты исследований морских донных отложений, океаническая карбонатная система в течение этого периода существенно деградировала, следствием чего могло стать заметное увеличение

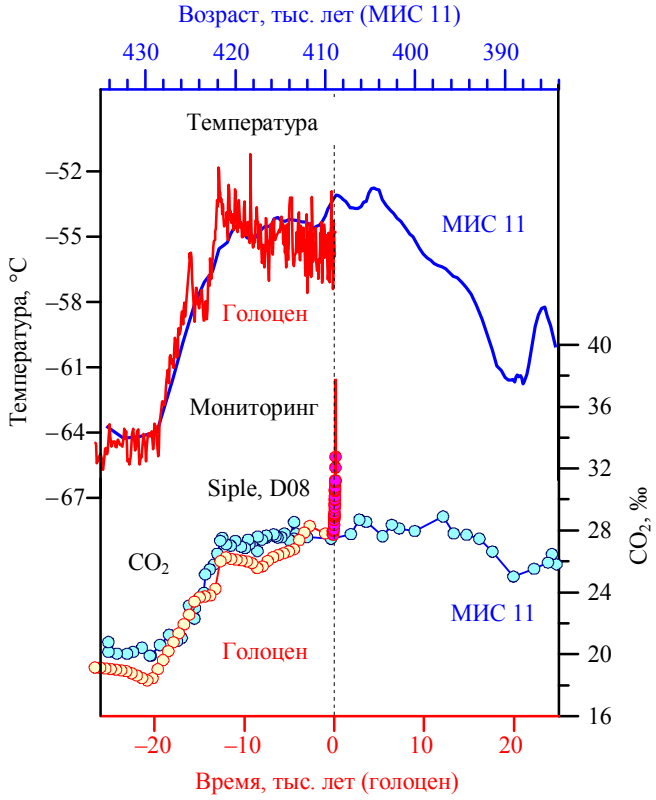


Рис.6. Сравнение хода изменений температуры в Центральной Антарктиде и концентрации CO_2 в атмосфере Земли в эпоху МИС 11 и в голоцене по данным керна со станции «Восток» [1]. Антропогенный рост концентрации CO_2 (начиная с 1850 г.) показан по данным газовых анализов ледяных кернов, полученных в районах Антарктиды с высокой аккумуляцией снега на станциях «Siple» и D08 (залитые кружки), а также по данным инструментального мониторинга газового состава атмосферы (красная линия)

концентрации CO_2 в атмосфере. Во-вторых, есть свидетельства того, что уровень Мирового океана в эту эпоху был на 20 м выше современного. Третья, еще более интригующая особенность МИС 11 состоит в том, что орбитальные параметры нашей планеты, от которых зависит распределение солнечной энергии на земной поверхности, изменяются на протяжении голоцена и будут продолжать изменяться в течение ближайших тысячелетий таким же образом, как это происходило в эпоху МИС 11. Последнее обстоятельство делает МИС 11 «орбитальным аналогом» голоцена и позволяет рассматривать сценарий климатических изменений в эпоху МИС 11 в качестве потенциального аналога естественных глобальных изменений климата, ожидающих нашу планету в ближайшем будущем.

Результаты исследований ледяных кернов со станции «Восток» показывают, что изменения температуры воздуха и количества парниковых газов в преиндустриальную эпоху голоцена действительно происходили по сценарию, реконструированному по керну станции «Восток» для первой половины МИС 11 (рис.6).

Концентрация CO_2 на всем протяжении МИС 11 не превышала уровня, характерного для последующих межледниковых периодов, и, следовательно, наблюдаемый в настоящее время рост концентрации парниковых газов в атмосфере является беспрецедентным для последних 440 тыс. лет.

Таким образом, данные, полученные на станции «Восток», говорят нам о том, что эпоха МИС 11 была подобна текущему межледниковью и что без антропогенного воздействия на природную среду Земли мы, по всей видимости, имели бы впереди еще 16 тыс. лет умеренно теплого климата, который продолжался бы вплоть до неизбежного начала нового глобального похолодания, связанного с наступлением очередного ледникового периода на нашей планете.

Заключение. Достигнутые успехи стали возможны в результате: теоретического обобщения и углубления фундаментальных знаний о сложных процессах, протекающих в массиве льда при вскрытии его скважиной; установления основных закономерностей изменения по глубине структурных и физических свойств антарктического ледникового покрова, определяющих механические и реологические свойства ледяной породы, которые влияют на проходку скважины и поддержание ее в рабочем состоянии; создания безопасных и конкурентоспособных технологий бурения мощных ледовых толщ и экологически безопасной технологии проникновения в подледниковые водоемы и разработок оригинальных комплексных технологий исследования керна льда.

О высоком инновационном уровне созданных технологий объективно свидетельствуют результаты бурения скважины 5Г на станции «Восток» в Антарктиде, дважды выполненное вскрытие подледникового озера Восток, что подтвердило эффективность разработанных технических средств и технологических решений. Скважина 5Г в настоящее время является самой глубокой в мире, на 300 м превышая достигнутые зарубежными специалистами глубины.

Полученные результаты открывают перед российскими учеными широкие перспективы проведения комплексных исследований подледникового озера Восток с целью приобретения новых данных о глобальных изменениях природной среды планеты.

Приведенные выше и многие другие результаты исследований палеоклимата по данным анализа ледяного керна со станции «Восток» получили широкое признание международной научной общественности. Они были использованы при подготовке второго, третьего и четвертого докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК/IPCC см. http://www.ipcc.ch) и предоставлялись в 2003 г. Администрации Президента Российской Федерации для выработки научно обоснованной позиции нашего государства в отношении подписания Киотского договора об ограничении выбросов парниковых газов в атмосферу.

Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за логистическое обеспечение данных работ. Детальные изотопные исследования ледяного керна в интервале глубин, соответствующем морской изотопной стадии 11, были выполнены по программе и при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 14-27-00030.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Котляков В.М.* Глубокое бурение в Центральной Антарктиде и проникновение в подледное озеро Восток / В.М.Котляков, В.Я.Липенков, Н.И.Васильев // Вестник РАН. 2013. Т.83. № 7. С.591-605.

2. *Кудряшов Б.Б.* Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Б.Б.Кудряшов, В.К.Чистяков, В.С.Литвиненко. Л.: Недра, 1991. 295 с.

3. *Кудряшов Б.Б.* Бурение ледникового покрова Антарктиды тепловым способом / Б.Б.Кудряшов, В.К.Чистяков, В.А.Морев // 25 лет Советской антарктической экспедиции. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. С.149-158.

4. *Липенков В.Я.* Особенности строения антарктического ледникового покрова в районе станции Восток по результатам петроструктурных исследований ледяного керна / В.Я.Липенков, Е.В.Полякова, П.Дюваль, А.В.Преображенская // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып.76. С.68-77.

5. *Липенков В.Я.* История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного керна со станции Восток / В.Я.Липенков, Н.И.Барков, А.Н.Саламатин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. Вып.72. С.197-236.

6. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток / Н.И.Васильев, В.Я.Липенков, А.Н.Дмитриев, А.В.Подоляк, В.М.Зубков // Лед и снег. 2012. № 4 (120). С.12-20.

7. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica / A.P.Kapitsa, J.K.Ridley, G. de Q.Robin, M.J.Siegert, I.A.Zotikov // Nature. 1996. Vol.381. N 6584. P.684-686.

8. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 1. Design concepts / A.J.Shturmakov, D.A.Mason, W.P.Bentley, C.R.Lebard // Annal. Glaciol. 2007. 47. P.28-34.

9. *Augustin L.* The EPICA deep drilling program / L.Augustin, A.Antonelli. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. 56, Special Issue. P.226-244.

10. Behavior of a deep hole drilled in ice at Vostok station / V.K.Chistyakov, A.V.Krasilev, V.Ya.Lipenkov, J.Ph.Balestrieri, C.Rado, J.R.Peti // Mem., Natl. Inst. Polar Res. 1994. 49, Special Issue. P.247-255.

11. *Bentley C.R.* Drilling to the beds of the Greenland and Antarctic ice sheets: a review / C.R.Bentley, B.R.Koci // Ann. Glaciol. 2007. 47. P.1-9.

12. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica / J.R.Petit, J.Jouzel, D.Raynaud, N.I.Barkov, J.M.Barnola, I.Basile, M.Bender, J.Chappellaz, M.Davis, G.Delague, M.Delmotte, V.M.Kotlyakov, M.Legrand, V.Ya.Lipenkov, C.Lorius, L.Pepin, C.Ritz, E.Saltzman, M.Stievenard // Nature. 1999. Vol.399. N 6735. P.429-436.

13. Crystalline texture of the 2083 m ice core at Vostok Station / V.Ya.Lipenkov, N.I.Barkov, P.Duval, P.Pimienta // Journal of Glaciology. 1989. Vol.35, 121. P.392-398.

14. Deep ice core drilling to 2503 m depth at Dome Fuji, Antarctica / Y.Fujii and 25 others // Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. 56, Special Issue. P.103-116.

15. Deep ice coring at Vostok Station (East Antarctica) by an electromechanical drill / B.B.Kudryashov, N.I.Vasiliev, R.N.Vostretsov, A.N.Dmitriev, V.M.Zubkov, A.V.Krasilev, P.G.Talalay, N.I.Barkov, V.Ya.Lipenkov, J.R.Petit // Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. 56, Special Issue. P.91-102.

16. Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and last events / N.I.Vasiliev, P.G.Talalay, N.E.Bobin, V.K.Chistyakov, V.M.Zubkov, A.V.Krasilev, A.N.Dmitriev, S.V.Yankilevich, V.Ya.Lipenkov // Annal. Glaciol. 2007. Vol.47. P.10-23.

17. *Gundestrup N.S.* ISTUK: a deep ice core drill system / N.S.Gundestrup, S.J.Johnsen, N.Reeh // CRREL. Spec. Rep. 1984. P.7-19.

18. *Lipenkov V.Ya.* Vostok ice core project // PAGES news. 2006. Vol.14. N 1. P.29-31.

19. *Lukin V.V.* Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica / V.V.Lukin, N.I.Vasiliev // Annal. Glaciol. 2014. 55(65). P.83-89.

20. Proposal for penetration and exploration of sub-glacial Lake Vostok, Antarctica / S.R.Verkulich, B.B.Kudryashov, N.I.Barkov, N.I.Vasiliev, R.N.Vostretsov, A.N.Dmitriev, V.M.Zubkov, A.V.Krasilev, P.G.Talalay, V.Ya.Lipenkov, L.M.Savatyugin, I.N.Kuz'mina // Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. Vol.56. P.245-252.

21. *Ridle G.P.* Laxon Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter / G.P.Ridle, S.W.Gudlip // Jurn. of Glaciology. 1993. Vol.39. N 133. P.655-657.

22. The new improved version of the ISTUK ice core drill / S.J.Johnsen, N.S.Gundestrup, S.B.Hansen, J.Schwander, H.Rufli // Mem., Natl. Inst. Polar Res. 1994. 49, Special Issue. P.9-23.

REFERENCES

1. *Kotlyakov V.M.*, *Lipenkov V.Ya.*, *Vasilev N.I.* Glubokoe burenie v Zentralnoy Antarktide i proniknovenie v podlednikovoe ozero Vostok (*Deep Drilling in Central Antarctica and Penetration into Subglacial Lake Vostok*). Vestnik RAN, 2013, Vol.83. N 7, p.591-605.

2. *Kudryashov B.B.*, *Chistyakov V.K.*, *Litvinenko V.S.* Burenie skvazhin v usloviyah izmeneniya agregatnogo sostoyaniya gornih porod (*Bore-hole drilling in the condition of rock aggregate changes*). Leningrad: Nedra, 1991, p.295.

3. *Kudryashov B.B.*, *Chistyakov V.K.*, *Morev V.A.* Bureniye ledianogo pokrova Antarktidi teplovim sposobom. 25 let Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii (*Drilling of a glacial cover of Antarctica by thermal way. 25 years of the Soviet Antarctic expedition*). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, p.149-158.

4. *Lipenkov V.Ya.*, *Poliakova E.V.*, *Duval P.*, *Preobrajenskaia A.V.* Osobennosti stroenia antarkticheskogo lednikovogo pokrova v raione stanzii Vostok po rezultatam petrostrukturnix issledovaniy ledianjva kerna (*Features of a structure of the Antarctic glacial cover around station Vostok by results петростуктурных researches of an ice core*). Prodlemi Arktiki I Antarktiki. 2007. Iss.76, p.68-77.

5. *Lipenkov V.Ya.*, *Barkov N.I. Salamatin A.N.* Istoria klimata i oledineniia Antarktidi po resultatam izuchenie ledianogo kerna so stanzii Vjstok (*History of a climate and freezing of Antarctica by results of studying of an ice core from station Vostok*). Prodlemi Arktiki i Antarktiki. 2000. Iss.72, p.197-236.

6. *Vasiliev N.I.*, *Lipenkov V.Ya*, *Dmitriev A.N.*, *Podjliak A.V.*, *Zubkov V.M.* Rezultati i osobennosti burenia skvagini 5G i pervogo vskritia ozera Vostok (*Results and features of drilling of borehole 5G and the first opening of lake Vostok*). Led i sneg. 2012. N 4 (120), p.12-20.

7. *Kapitsa A.P.*, *Ridley J.K.*, *Robin G. de Q.*, *Siegert M.J.*, *Zotikov I.A.* A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica. Nature. 1996. Vol.381. N 6584, p.684-686.

8. *Shturmakov A.J.*, *Mason D.A.*, *Bentley W.P.*, *Lebard C.R.* A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 1. Design concepts. Annal. Glaciol. 2007. 47, p.28-34.

9. *Augustin L.*, *Antonelli A.* The EPICA deep drilling program. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. 56, Special Issue, p.226-244.

10. *Chistyakov V.K.*, *Krasilev A.V.*, *Lipenkov V.Ya.*, *Balestrieri J.Ph.*, *Rado C.*, *Peti J.R.* Behavior of a deep hole drilled in ice at Vostok station. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 1994. 49, Special Issue, p.247-255.

11. *Bentley C.R.*, *Koci B.R.* Drilling to the beds of the Greenland and Antarctic ice sheets: a review. Ann. Glaciol. 2007. 47, p.1-9.

12. *Petit J.R.*, *Jouzel J.*, *Raynaud D.*, *Barkov N.I.*, *Barnola J.M.*, *Basile I.*, *Bender M.*, *Chappellaz J.*, *Davis M.*, *Delague G.*, *Delmotte M.*, *Kotlyakov V.M.*, *Legrand M.*, *Lipenkov V.Ya.*, *Lorius C.*, *Pepin L.*, *Ritz C.*, *Saltzman E.*, *Stievenard M.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature. 1999. Vol.399. N 6735, p.429-436.

13. *Lipenkov V.Ya.*, *Barkov N.I.*, *Duval P. Pimienta P.* Crystalline texture of the 2083 m ice core at Vostok Station. Journal of Glaciology. 1989. Vol.35, 121, p.392-398.

14. *Fujii Y. and 25 others*. Deep ice core drilling to 2503 m depth at Dome Fuji, Antarctica. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. 56, Special Issue, p.103-116.

15. *Kudryashov B.B.*, *Vasiliev N.I.*, *Vostretsov R.N.*, *Dmitriev A.N.*, *Zubkov V.M.*, *Krasilev A.V.*, *Talalay P.G.*, *Barkov N.I.*, *Lipenkov V.Ya.*, *Petit J.R.* Deep ice coring at Vostok Station (East Antarctica) by an electromechanical drill. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. 56, Special Issue, p.91-102.

16. *Vasiliev N.I.*, *Talalay P.G*, *Bobin N.E.*, *Chistyakov V.K.*, *Zubkov V.M.*, *Krasilev A.V.*, *Dmitriev A.N.*, *Yankilevich S.V.*, *Lipenkov V.Ya.* Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and last events. Annal. Glaciol. 2007. Vol.47, p.10-23.

17. *Gundestrup N.S. Johnsen S.J.*, *Reeh N.* ISTUK: a deep ice core drill system. CRREL. Spec. Rep. 1984, p.7-19.

18. *Lipenkov V.Ya.* Vostok ice core project. PAGES news. 2006. Vol.14. N 1, p.29-31.

19. *Lukin V.V.*, *Vasiliev N.I.* Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. Annal. Glaciol. 2014. 55(65), p.83-89.

20. *Verkulich S.R.*, *Kudryashov B.B*, *Barkov N.I.*, *Vasiliev N.I.*, *Vostretsov R.N.*, *Dmitriev A.N.*, *Zubkov V.M.*, *Krasilev A.V.*, *Talalay P.G*, *Lipenkov V.Ya.*, *Savatyugin L.M.*, *Kuz'mina I.N.* Proposal for penetration and exploration of subglacial Lake Vostok, Antarctica. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 2002. Vol.56, p.245-252.

21. *Ridle G.P.*, *Gudlip S.W.* Laxon Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter. Jurn. of Glaciology. 1993. Vol.39. N 133, p.655-657.

22. *Johnsen S.J.*, *Gundestrup N.S.*, *Hansen S.B.*, *Schwander J.*, *Rufli H.* The new improved version of the ISTUK ice core drill. Mem., Natl. Inst. Polar Res. 1994. 49, Special Issue, p.9-23.

RESULTS OF THE 5G BOREHOLE DRILLING AT RUSSIAN ANTARCTIC STATION «VOSTOK» AND RESEARCHES OF ICE CORES

N.I.VASILEV, *Dr. of Engineering Sciences*, *Senior Researcher*, *vasilev_n@mail.ru*
A.N.DMITRIEV, *PhD in Engineering Sciences*, *Assistant Professor*, *1234567890nika@vail.ru*
Saint-Petersburg Mining University, *Russia*
V.Ya.LIPENKOV, *PhD in Geography*, *Senior Researcher*, *lipenkov@aari.ru*
Arctic and Antarctic Research Institute, *St Petersburg*, *Russia*

We produce an information about results and features of the 5G borehole drilling in Antarctic layer at Russian station Vostok. Main regularities of the change structured and physical properties by Antarctic ice layer depth, which determine mechanical and reological properties if ice, which influence to sinking of a borehole and to the maintaining of it in a working condition, the safe and competitive technologies creation for drilling of strong ice layers and the environmentally safe technology of the subglacial reservoirs unsealing. We also produce results of the ice cores researching and the paleoclimatic raws construction, which are reconstructed by the ice cores researching from Vostok station, which is compared with isotopic graph. This graph describes changes of World ocean level.

***Key words*:** Antarctica, drilling, additional hole, ice layer, ice, lake, borehole, core.