

УДК 622.243.2

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ 5Г НА АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «ВОСТОК»

Подоляк А.В.

*ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия (199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2), e-mail: [podolyak.aleksey@gmail.com](mailto:podolyak.aleksey@gmail.com)*

Приводятся сведения об особенностях бурения скважины 5Г, пробуренной в ледниковом покрове на российской антарктической станции «Восток». Описана конструкция скважины и представлены данные по результатам вскрытия озера Восток, а также результаты работ гляцио-бурового отряда на станции «Восток» в сезоне 58-й Российской антарктической экспедиции. Описываются причины аварий при бурении скважины 5Г и технология забуривания дополнительных стволов термобуровым и электромеханическим снарядами. Проведен расчет пространственного положения ствола 5Г-2 по методике замеров толщин серповидной части керна, образующейся при забуривании дополнительного ствола. Описан процесс расширения ствола 5Г-1 на глубинах 3176,3-3415,1 м после попадания в ствол скважины озёрной воды и забуривания ствола 5Г-3, приведён анализ полученных данных. Обсуждается опыт использования и эффективность применения снарядов на грузонесущем кабеле для направленного бурения в ледовых массивах.

Ключевые слова: Антарктида, вскрытие, глубокое бурение, дополнительный ствол, ледниковый покров, ледяной керн, подледниковое озеро Восток, скважина.

## THE METHOD OF CALCULATING THE SPATIAL POSITION OF 5G BOREHOLE AT THE ANTARCTIC STATION VOSTOK

Podolyak A.V.

*The National Mineral Resources University (University of Mines), Saint-Petersburg, Russia (199106, Saint-Petersburg, 21st line V.O., 2), e-mail: [podolyak.aleksey@gmail.com](mailto:podolyak.aleksey@gmail.com)*

I present information about the features of drilling borehole 5G, drilled in ice layer at the Russian Antarctic station Vostok. Borehole construction, the data of the penetration of Lake Vostok and the results of glaciological-drilling group at the Vostok station in the 58th season of the Russian Antarctic Expedition are presented. The crash reasons of the drilling borehole 5G and the technology of starting the branch holes are described via termodrill and electromechanical drill. The calculation of spatial position of hole 5G-2 is discussed by the method of measuring the thickness of the crescent-shaped core, formed during collaring additional barrel. The widening process of the hole is presented at the depth 3176.3-3415.1 m after penetration of the lake's water into the hole. The analysis of the derived data is presented. The process of start the hole 5G-3 and an analysis of the data are obtained. I discuss the experience of the use and effectiveness of drill on the carrying cable for directional drilling in ice layers.

Key words: Antarctic, unsealing, deep drilling, additional hole, ice layer, ice core, subglacial lake Vostok, borehole.

### Введение

Разработка технологии и техники бурения скважин в ледниках началась кафедрой бурения скважин Национального минерально-сырьевого университета «Горный» в 1967 году. За это время было пробурено множество скважин в различных полярных областях нашей планеты. Керна древнего льда, добываемые при колонковом бурении глубоких скважин в современных ледниковых покровах, содержат наиболее полную информацию о колебаниях температуры и давления атмосферы, об изменениях ее ветрового и циркуляционного режима, а также о вариациях газового и химического состава атмосферного воздуха в масштабах времени от десятков до сотен тысяч лет. Микробиологические и молекулярно-биологические исследования ледяного керна позволяют проследить эволюцию микробного

разнообразия в слоях ледниковой толщи, которые формировались в разные эпохи климатической истории Земли.

На станции «Восток» в Антарктиде 5 февраля 2012 года ствол скважины 5Г достиг поверхности реликтового подледникового озера Восток – крупнейшего подледникового водоема на нашей планете, представляющего собой уникальную водную экосистему, изолированную от земной поверхности и поверхностной биосферы на протяжении миллионов лет. Значительные размеры озера (280 x 55 км, мощность водного слоя достигает 1200 м) позволяют рассматривать его в качестве земного аналога морей, существующих под ледяными панцирями на спутниках Юпитера Европа и Каллисто. В связи с этим озеро Восток представляет интерес как полигон для отработки методов и средств обнаружения и изучения жизни в экстремальных (внеземных) условиях.

При бурении глубоких скважин на станции Восток неоднократно возникала необходимость в отклонении от основного ствола скважины для получения дополнительного кернового материала и обхода интервалов сложных аварий и осложнений. Тем не менее разработке технологии многозабойного бурения скважин в ледовых массивах не уделяется должного внимания.

Возможность бурения многоствольных скважин во льду достаточно активно обсуждалась и экспериментально исследовалась в университетах США, однако перейти от стадии эскизных проектов и лабораторных тестов к практической реализации в силу различных причин так и не удалось.

### **Бурение скважины 5Г**

В настоящее время глубокая скважина на станции «Восток» представляет собой сложную многоступенчатую конструкцию (рис. 1).

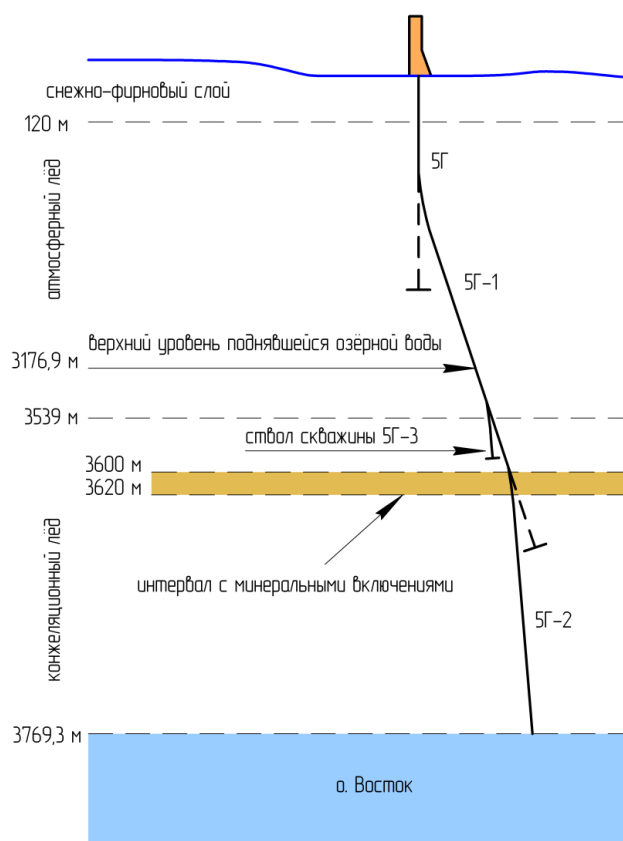


Рис. 1. Схема многоствольной скважины 5Г

Бурение скважины 5Г на станции «Восток» было начато в 35-ю Советскую антарктическую экспедицию (САЭ) в 1990 году тепловым способом. До глубины 120 м (снежно-фирновый слой) использовался термобуровой снаряд ТЭЛГА-14М. Затем термобуровым снарядом ТБЗС-152М скважина была пробурена без серьезных осложнений до глубины 2502,7 м [2]. Но 27 декабря 1991 г. во время подъема снаряда из скважины он оказался прихваченным на отметке 2259 м. Грузонесущий кабель был выдернут из кабельного замка снаряда. Аварийная ситуация была вызвана неполной компенсацией горного давления ледяной толщи гидростатическим. Участок скважины над аварийным снарядом был забутован искусственным подкрашенным керном до глубины 2232 м. Над аварийным снарядом были опущены образцы искусственного керна диаметром 93-95 мм и длиной 1,0-1,1 м. Всего в скважину было опущено около 35 м такого керна. Отклонение ствола скважины проводилось снарядом ТБЗС-132 с двухметровой колонковой трубой при общей длине снаряда 6 м. После проходки 14 м в интервале скважины 2232-2246 м был получен керн полного диаметра. Новый ствол получил название 5Г-1. Зенитный угол ствола 5Г-1 после отклонения составил 8°. Бурение ствола 5Г-1 до глубины 2755,3 м проводилось без особых осложнений.

#### **Забуривание дополнительного ствола 5Г-2**

Дальнейшее бурение ствола 5Г-1 проводилось электромеханическим снарядом КЭМС-135, [2]. Перед переходом на механический способ бурения в скважине была установлена обсадная колонна для перекрытия проницаемой фирновой зоны до глубины 120 м. На

глубине 3666 м в скважине снова произошла авария, в результате чего снаряд был заклинен. Из-за понижения плотности и уровня заливочной жидкости в скважине началось интенсивное сужение ее ствола над снарядом, о чем свидетельствовали данные кавернометрии. Многочисленные попытки поднять буровой снаряд путем расширения суженного участка ствола скважины и доставкой к заклиненному буровому снаряду этиленгликоля закончились обрывом грузонесущего кабеля и потерей бурового снаряда на глубине 3640 м. Учитывая большой интерес исследователей к керновому материалу на глубине 3600-3620 м, что вызвано наличием во льду на этих глубинах большого количества минеральных включений, было решено начать отклонение на глубине 3580 м для получения на глубине 3600 м полного керна. Отклонение выполнялось с использованием технологии без забутовывания аварийного ствола в заранее выбранном направлении при строгом контроле угла отклонения, для чего трехкратно проводилась инклинометрия участка. На данном интервале ствол скважины 5Г-1 имел зенитный угол, приблизительно равный 6° при постоянном азимуте. В процессе отклонения происходило формирование серповидного керна, что позволяло обеспечить дополнительный контроль процесса отклонения и оценку состояния стенок старого ствола скважины по величине керна (рис. 2) [3].

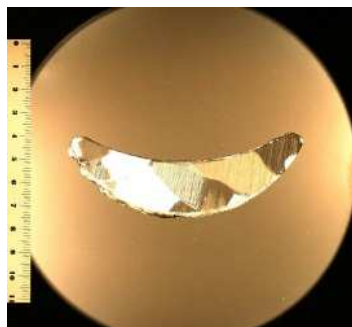


Рис. 2. Серповидный керн, образовавшийся в процессе забуривания ствола 5Г-2

По замерам толщин серповидного керна на интервалах забуривания ствола можно рассчитать угол расхождения стволов 5Г-1 и 5Г-2 по формуле:

$$\Delta\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{d_2 - d_1}{L_2 - L_1}\right).$$

На глубине 3600 м толщина серповидной части керна составила 104 мм, поскольку на этой глубине был получен сплошной керн и внутренний диаметр коронки составляет 104 мм. На глубине 3598,6 толщина серповидного керна составила 90 мм. Таким образом, угол расхождения стволов равен:

$$\Delta\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,104 - 0,09}{3600 - 3598,6}\right) = 0,57^\circ.$$

Следовательно, расчетный зенитный угол ствола 5Г-2 равен:

$$\theta_{5Г-2} = \theta_{5Г-1} - \Delta\theta;$$

$$\theta_{5\Gamma-2} = 6,1^\circ - 0,57^\circ = 5,53^\circ.$$

По результатам инклинометрии зенитный угол ствола 5Г-2 составил  $5,4^\circ$ . Измерения в скважине проводились инклинометром КИГ, погрешность которого по зенитному углу составляет  $\pm 30'$ , а по азимутальному  $-\pm 4^\circ$  [1]. Разница значений расчетного и полученного в результате измерений зенитного угла ствола скважины 5Г-2 находится в пределах погрешности прибора (таблица 1).

Таблица 1. Результаты инклинометрии ствола скважины 5Г-1 (2009 г.)

Интервал скважины, м	Зенитный угол, гр.	Азимутальный угол, гр.
3400	6	242
3410	6,2	243
3420	6,3	242
3430	6,2	242
3440	6,2	242
3450	6,3	243
3460	6,3	243

После участка забуривания дополнительного ствола 5Г-2, бурение велось в прямолинейном направлении. Следовательно, расстояние между новым стволом скважины и аварийным снарядом на глубине 3624 м составит:

$$y = \operatorname{tg} \Delta \theta \cdot \Delta L;$$

$$y = \operatorname{tg} (0,57^\circ) \cdot 24 = 0,198 \text{ м.}$$

Таким образом, можем определить интенсивность искривления и коэффициент кривизны криволинейной части ствола по формулам:

$$i = \frac{\Delta \theta}{\Delta L}, K = \frac{i \cdot \pi}{180^\circ};$$

$$i = \frac{0,57}{3598,6 - 3580} = 0,003^\circ / \text{м}, K = \frac{0,003 \cdot 3,14}{180} = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ рад} / \text{м.}$$

Радиус искривления ствола определяется по формуле:

$$R = \frac{180^\circ}{i \cdot \pi} = \frac{1}{K}; R = \frac{1}{5,2 \cdot 10^{-4}} = 1923,08 \text{ м.}$$

Зная радиус искривления скважины, необходимо рассчитать вписываемость снаряда при данных условиях:

$$R_1 = \frac{(L/2)^2 - (D_c^2 - D_{сн}^2)}{2(D_c - D_{сн})},$$

где  $R_1$  - внутренний радиус искривления, м;  $L$  - длина буровой компоновки, м;  $D_c$  - диаметр скважины, м;  $D_{сн}$  - диаметр снаряда, м.

Для наших условий при  $L=10$  м,  $D_c = 0,138$  м и  $D_{сн} = 0,127$  м -  $R_1 = 1136$  м, что соответствует максимально допустимой интенсивности искривления при центральном угле:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{l}{2(R_1 + D_{сн})} = 0,25;$$

$$i = 57,3 / R_1 = 0,05 \text{ град} / \text{м}.$$

$$R_1 = 1923,08 - 0,138 = 1922,94; i = 57,3 / 1922,94 = 0,03.$$

Таким образом, снаряд полностью вписывается в ствол скважины с данной интенсивностью искривления.

В ходе отклонения выполнено 17 рейсов и получено 3,5 м керна, пригодного для всесторонних анализов. Обнаружено два небольших минеральных включения. Экспериментальные работы по забурированию нового ствола 5Г-2 показали высокую эффективность технологии направленного бурения снарядом на грузонесущем кабеле без применения специальных устройств-отклонителей.

### Расширение ствола 5Г-1

В результате вскрытия озера Восток в сезоне 57 РАЭ на глубине 3769,3 м, вода поднялась в стволе скважины. Во время проведения работ по расширению ствола 5Г-1 с глубины 3415,1 м был поднят первый сплошной керн замерзшей воды озера, что сигнализировало об установлении конечного уровня озерной воды на этой глубине. С этого момента ствол скважины было принято назвать 5Г-1Н (новый), поскольку это фактически бурение нового ствола, который только лишь по пространственному положению совпадает со старым стволом. Таким образом, интервал, на который опустилась озерная вода, составил 238,8 м.

В результате бурения ствола 5Г-1Н удалось поднять на поверхность 44,59 м сплошного керна, содержащего замерзшую воду озера Восток (рис. 3, интервал 3415,1-3459,69 м).

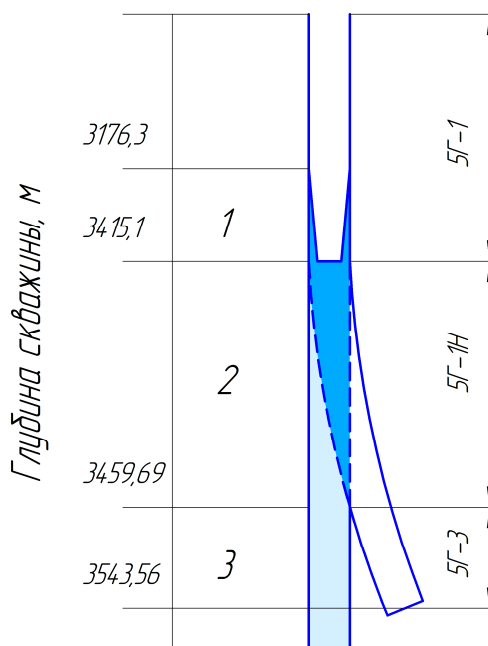


Рис. 3. Результаты работ по бурению скважины 5Г в сезоне 58 РАЭ: 1 – расширение ствола 5Г-1; 2 – бурение ствола 5Г-1Н с отклонением от оси старого ствола; 3 – бурение ствола 5Г-3.

### **Особенности бурения стволов 5Г-1Н и 5Г-3**

Керн, полученный в результате бурения ствола скважины 5Г-1Н, имел серповидные включения льда на одной его стороне, что указывало на наличие отклонения нового ствола 5Г-1Н от оси ствола 5Г-1 (рис. 4). Отклонение могло произойти ещё в процессе расширения ствола скважины 5Г-1 до постановки на забой снаряда и получения сплошного керна за счет возможного фрезерования стенок резцами коронки. Такой вывод был сделан по результатам получения первого сплошного керна с серповидным слоем на одной его стороне в самом начале, начиная с глубины 3424,0 м.

Забуривание ствола 5Г-3 происходило за счет действия естественных причин, действующих в совокупности или раздельно [4; 5]:

- местное искривление во время расширения ствола 5Г-1 коронкой за счёт того, что диаметр нерасширенного ствола на верхних интервалах был меньше внутреннего диаметра коронки, в результате чего мог произойти перекося снаряда;
- во время бурения ствола 5Г-1Н за счет искривления старого ствола 5Г-1;
- местное искривление нового ствола 5Г-1Н в результате многократных постановок снаряда на забой в различных пространственных положениях;
- в результате искривления ствола 5Г-1Н в процессе бурения с траекторией по окружности с определенной интенсивностью.

Искривление ствола 5Г-1Н наиболее вероятно являлось зенитным, при этом выкручивание при бурении ствола с отклонением по вертикали  $6^\circ$ . Азимутальное искривление менее вероятно.

### **Заключение**

При бурении глубокой скважины 5Г на станции Восток в Антарктиде получен большой объем данных по изучению палеоклимата нашей планеты. Скважина на данный момент имеет сложную многоствольную конструкцию, и неоднократно возникала необходимость применения технологии бурения дополнительных стволов снарядами на грузонесущем кабеле. Применение таких снарядов для забуривания дополнительных стволов при бурении скважины 5Г показывает высокую эффективность и обеспечило возможность повторного отбора конжеляционного льда, содержащего минеральные включения и проникновения в реликтовое подледниковое озеро Восток на глубине 3769,3 м. Предложенная в статье методика расчета пространственного положения ствола скважины на участке забуривания дополнительного ствола обеспечила возможность проведения анализа происходящих в скважине процессов отклонения снаряда от первоначальной траектории.

## Список литературы

1. Афанасьев и др. Справочник по бурению геологоразведочных скважин. – СПб. : ООО «Недра», 2000.
2. Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Зубков В.М. Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток // Лёд и снег. - 2012. - № 4. - С. 12–20.
3. Липенков В.Я., Полякова Е.В., Дюваль П., Преображенская А.В. Особенности строения антарктического ледникового покрова в районе станции Восток по результатам петроструктурных исследований ледяного керна // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2007. - Вып. 76. - С. 68–77.
4. Морозов Ю.Т. Методика и техника направленного бурения скважин на твёрдые полезные ископаемые. - Л. : Недра, 1987.
5. Сулакшин С.С. Направленное бурение. - М. : Недра, 1987.

### Рецензенты:

Загивный Э.А., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники, электроэнергетики и электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный», г. Санкт-Петербург.

Морозов Ю.Т., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бурения скважин Национального минерально-сырьевого университета «Горный», г. Санкт-Петербург.