

# Экспресс - информация

УДК 551.32:551.583.2

doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-255-260

## В поисках древнейшего льда Антарктиды

© 2018 г. В.Я. Липенков<sup>1\*</sup>, А.А. Екайкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;  
<sup>2</sup>Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;  
 \*lipenkov@aari.ru

## Hunting for Antarctica's oldest ice

V.Ya. Lipenkov<sup>1\*</sup>, A.A. Ekaykin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia; <sup>2</sup>Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia  
 \*lipenkov@aari.ru

Received May 3, 2018

Accepted May 7, 2018

**Keywords:** *Antarctica, deep drilling, ice dating, Mid-Pleistocene Transition, oldest ice, paleoclimatic reconstruction.*

### Summary

One of the key priority tasks for the international Antarctic community is drilling and studying old Antarctic ice with age exceeding 1 million years in order to investigate possible reasons for the Mid-Pleistocene Transition. During the 2017–2018 austral season at Vostok Station, we carried out microscopic study of geometrical properties of the crystalline inclusions of air hydrates in ice core samples from boreholes 5G-3 (Vostok) and DC2 (EPICA DC) in depth intervals where the age of the ice exceeded 400,000 years. The obtained data confirmed the existence of a robust linear relationship between the mean radius of the hydrates and the age of the ice in the bottom part of the East Antarctic ice sheet, and will be useful for further development of the new dating technique based on the phenomena of hydrate growth in polar ice. Preliminary, the age of the atmospheric ice bedded at Vostok at a depth of 3538 m, inferred from the data on the size of the hydrates, amounts to  $1.3 \pm 0.17$  million years. The existence of ice older than 1 million years in the vicinity of Vostok implies that in the area of Ridge B, where the ice flow line which passes through Vostok Station originates, even older ice, with undisturbed stratigraphy, may exist. It would be desirable therefore to carry out a glacio-geophysical traverse to Ridge B in order to implement a detailed study of Dome B area aimed at identifying the most suitable site for a new deep drilling of the Antarctic ice sheet.

**Citation:** Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A. Hunting for Antarctica's oldest ice. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (2): 255–260. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-255-260

Поступила 3 мая 2018 г.

Принята к печати 7 мая 2018 г.

**Ключевые слова:** *Антарктида, гидраты, глубокое бурение, датирование льда, древний лёд, климатическая перестройка, палеоклиматическая реконструкция, плейстоцен.*

Сделан краткий обзор деятельности международного антарктического сообщества по поиску древнего льда в Антарктиде. Приведены предварительные результаты работ, полученные на станции Восток в период 63-й Российской антарктической экспедиции, которые подтверждают, что возраст льда в уже полученном на станции керне превышает 1 млн лет. Сформулированы первоочередные задачи дальнейших исследований древнего антарктического льда на станции Восток и в районе Ледораздела В.

В области изучения прошлых изменений климата, их причин и механизмов к наиболее приоритетным задачам международного антарктического сообщества относятся получение и исследование керна древнего антарктического льда, возраст которого превышает 1 млн лет [1]. Комплексные исследования такого керна позволят понять причины перестройки климатиче-

ской системы планеты в середине плейстоцена (Mid Pleistocene Transition – МРТ), которая примерно 1 млн лет назад привела к смене 40-тысячелетней периодичности в чередовании ледниковых и межледниковых эпох на 100-тысячелетнюю с более амплитудными и продолжительными климатическими колебаниями. Начиная с 2004 г., поиск древнего льда в Антарктиде

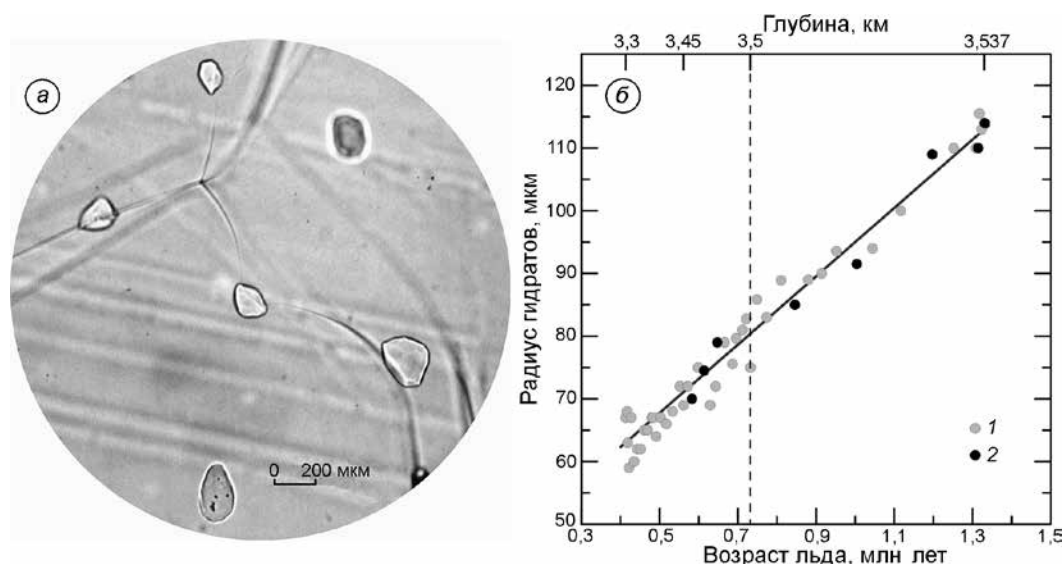
(The Oldest Ice Project) занимает первое место в ряду основных международных проектов, поддерживаемых Координационным комитетом программы «Международное партнерство в исследованиях ледяных кернов» (International Partnership in Ice Core Science – IPICS) [2]. Считается, что атмосферный лёд возрастом 1,5 млн лет с ненарушенным залеганием ледяных слоёв может быть найден в основании восточно-антарктического ледникового покрова. Наиболее благоприятные районы для поиска древнего льда – ближайшие окрестности крупнейших куполов Восточной Антарктиды (А, В, С и F) и седловины ледоразделов в местах, которые характеризуются умеренной мощностью ледникового покрова (порядка 2500 м), плоским рельефом подледникового ложа, близкой к нулевой скоростью горизонтального движения льда, отсутствием таяния на ложе и низкой скоростью аккумуляции ледяных отложений [3].

Активную деятельность по поиску древнего льда ведут европейские, американские, австралийские, японские и китайские учёные. В антарктический сезон 2010/11 г. китайские специалисты приступили к выполнению национального проекта глубокого бурения льда на Куполе А (станция Куньлунь). К настоящему времени достигнута глубина 800 м. Весь полученный ледяной керн вывезен из Антарктиды в Шанхайский Институт полярных исследований, но исследования его пока не начаты. Американские учёные предпринимают попытки получить предварительную информацию о газовом составе атмосферы Земли во время и до МРТ, изучая древний голубой лёд, обнаруженный в Трансантарктических горах в районе Алан Хиллс (Allan Hills). Возраст этого льда достигает 1 млн лет [4], а по последним сообщениям – даже 2,7 млн лет, если доверять аргоновым датировкам. Однако особенности залегания голубого льда таковы, что он позволяет получить только снимок состояния атмосферы с весьма неопределённой временной привязкой.

В 2016 г. консорциум четырнадцати научно-исследовательских организаций из десяти европейских стран начал реализацию предварительной фазы проекта Beyond EPICA-Oldest Ice (BE-OI). В работе на правах партнёров участвуют американские, австралийские и японские учёные. На предварительный этап этого проекта в 2016–2019 гг. выделено существенное фи-

нансирование из новой европейской рамочной программы «Горизонт 2020». Научная программа первого этапа предусматривает рекогносцировочные работы в Антарктиде, развитие новых методов датирования и аналитических исследований льда, а также создание новых технологий и технических средств для быстрого получения предварительной информации о строении, составе и возрасте ледниковой толщи. В рамках проекта BE-OI ведётся поиск древнейшего льда в окрестностях антарктических Куполов С (район франко-итальянской ст. Конкордия) и F (район японской ст. Купол Фуджи) [5, 6]. В соответствии с текущими планами консорциума BE-OI бурение глубокой скважины на древний лёд может быть начато в 40 км к юго-западу от Купола С уже в 2019–2020 гг.

Проект Vostok Oldest Ice Challenge (VOICE), предложенный и обоснованный в работе [7], рассматривается международным научным сообществом как возможный российский вклад в решение проблемы поиска и исследования древнего антарктического льда. Реализация этого проекта могла бы дать важные результаты как в области исследования причин МРТ, так и в области разработки методов изучения древнего льда ещё до старта большого международного проекта глубокого бурения в районе ст. Конкордия, что способствовало бы более тесному сотрудничеству российских учёных с консорциумом BE-OI. Проект VOICE предполагает детальное исследование строения и состава ледяной толщи, залегающей в районе ст. Восток глубже нижней границы ненарушенного климатического сигнала в ледяном керне, которая зафиксирована на глубине 3310 м (возраст льда 420 тыс. лет). Частичное нарушение первичной стратиграфической последовательности ледяных слоёв в интервале глубин 3310–3539 м не позволяет датировать керн традиционными методами, основанными на использовании временных рядов температуры и скорости аккумуляции льда, реконструированных по изотопным данным. Для оценки возраста ледяного керна в этом интервале предложено использовать рост гидратов воздуха во льду [8]. Рост кристаллических включений клатратных гидратов воздуха в полярных ледниковых покровах происходит за счёт диффузии молекул газа через кристаллическую решётку льда. Строгое математическое описание



**Рис. 1.** Кристаллические включения клатратных гидратов воздуха в керне древнего льда со станции Восток: *a* – вид гидратных включений под микроскопом (сква. 5Г-3, глубина 3512 м); *б* – линейная зависимость среднего радиуса гидратов от возраста льда: 1 – результаты измерений по керну скв. 5Г-1 [8, 11]; 2 – новые данные, полученные в сезон 63-й РАЭ по керну скв. 5Г-3. Возраст льда до глубины 3500 м оценивался по экстраполированной гляциологической временной шкале GTS-III [12]; глубже 3500 м установленная линейная зависимость использовалась для оценки возраста льда по размеру гидратов

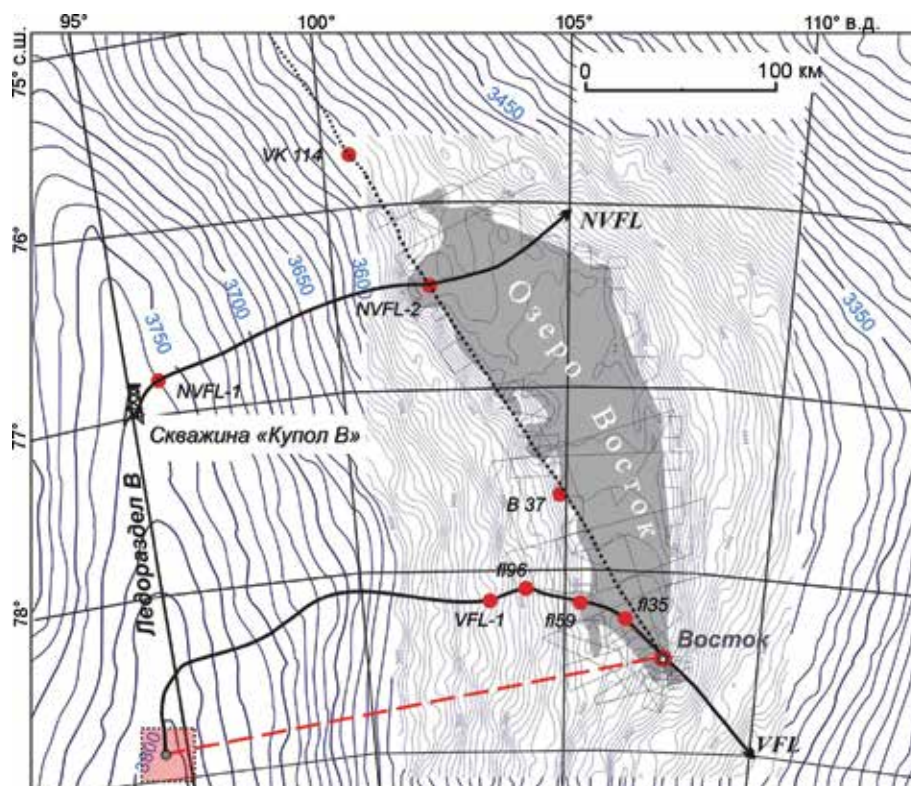
**Fig. 1.** Crystalline inclusions of air clathrate hydrates in the core of old ice from Vostok Station: *a* – a view of the hydrate inclusions under a microscope (borehole 5G-3, depth 3512 m); *б* – the linear relationship between the mean radius of air hydrates and the age of the ice: 1 – results of measurements implemented on the ice core from borehole 5G-1 [8, 11]; 2 – new data obtained from the 5G-3 ice core during the last austral season (63 RAE). Above a depth of 3500 m, the age of ice has been estimated using extrapolated glaciological timescale GTS-III [12]; below 3500 m the linear relationship established above has been used to estimate the age of the ice on the basis of the measured sizes of hydrates

этого процесса дано в работе А.Н. Саламатина с соавторами [9]. Модель описывает эволюцию распределения гидратов по размерам во времени и, следовательно, позволяет оценивать приращение возраста гидратов по экспериментальным данным об их геометрических характеристиках. Исследование процесса роста гидратов в придонных частях ледникового покрова, выполненное с помощью этой модели, сопряжённой с моделью движения ледника, показало, что в наиболее древних (старше 400 тыс. лет) ледяных отложениях средний радиус включений увеличивается линейно с возрастом льда [8]. Этот теоретический вывод подтверждён экспериментальными данными о размере гидратов в хорошо датированном ледяном керне со ст. Купол Фуджи, поднятом с глубины более 2500 м (возраст льда 400–720 тыс. лет) [10].

В январе 2018 г. в гляциологической лаборатории на ст. Восток были выполнены микроскопические исследования гидратов воздуха в ледяном керне из новой, «восточной» скв. 5Г-3 (рис. 1, *a*). Данные, полученные по

этому керну, хорошо согласуются с результатами предшествующих измерений по керну скв. 5Г-1 и подтверждают максимальные размеры гидратов, зафиксированные по старому керну в подошве толщи атмосферного льда (см. рис. 1, *б*). Предварительное датирование керна до глубины 3500 м выполнено путём экстраполяции гляциологической временной шкалы GTS-III [12]. На основе этой датировки и данных по размеру гидратов в интервале глубин 3450–3500 м (на рис. 1, *б* он ограничен вертикальным пунктиром) была уточнена линейная зависимость среднего радиуса гидратов от возраста льда. Экстраполяция этой зависимости на самую нижнюю часть керна позволила оценить возраст атмосферного льда, залегающего глубже 3500 м. Как следует из рис. 1, *б*, на глубине 3537 м возраст льда достигает примерно 1,3 млн лет.

В этом же полевом сезоне на ст. Восток впервые были выполнены измерения размера и счётной концентрации гидратов воздуха в ледяном керне из скв. DC2, пробуренной на Куполе С (ст. Конкордия) в рамках европейского проек-



**Рис. 2.** Гляциологические исследования Российской антарктической экспедиции в районе подледникового озера Восток и Ледораздела В.

VFL и NVFL – линии тока льда, берущие начало на Ледоразделе В и проходящие через ст. Восток (VFL) и северную часть оз. Восток (NVFL). Точечная линия – старая трасса транспортных походов Мирный – Восток. Красными кружками обозначены пункты бурения неглубоких скважин и исследования шурфов [13]. Красным пунктиром показан маршрут планируемого гляцио-геофизического похода на Ледораздел В в предполагаемый район залегания древнейшего антарктического льда (обозначен розовым квадратом). Длина отрезка линии тока VFL от ледораздела до ст. Восток – примерно 360 км, протяжённость трассы похода – 260 км

**Fig. 2.** Glaciological investigations of the Russian Antarctic Expedition in the areas of subglacial Lake Vostok and Ridge B. VFL and NVFL are ice flow lines which begin at Ridge B and pass through Vostok Station and the northern part of Lake Vostok respectively. The dotted line is the old route of the transport traverses between Mirny and Vostok. The red circles are sites of shallow coring and snow pit studies [13]. The red dashed line shows the route of a planned glacio-geophysical traverse towards Ridge B, in the area where the oldest Antarctic ice is thought to be bedded (shown by the pink square). The length of the VFL section between Ridge B and Vostok is about 360 km; the length of the planned traverse is 260 km

та EPICA. Исследования геометрических параметров гидратов по свежему керну этой скважины не проводились. Образцы керна, которые хранятся сейчас в лабораториях Гренобля, Бремерхафена и Берна, уже не пригодны для подобных исследований, поскольку более 80% гидратных включений во льду диссоциировало за годы хранения образцов при относительно высокой температуре ( $-20 \div -15 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Летом 2016 г. нами была подана заявка в Координационный научный комитет проекта EPICA на проведение исследований 23 образцов керна скв. DC2 в интервале глубин 2800–3259 м (возраст льда 450–800 тыс. лет) из низкотемпературной коллекции

этого керна, хранящейся в подснежном кернохранилище на ст. Конкордия. Заявка была одобрена, и в сезон 62-й Российской антарктической экспедиции отобранные на ст. Конкордия образцы были доставлены специальным авиарейсом на ст. Восток.

Результаты исследований этих образцов, которые планируется опубликовать совместно с французскими коллегами, подтвердили существование строгой линейной зависимости среднего радиуса гидратов от возраста льда в придонных слоях восточно-антарктического ледникового покрова. Сравнение данных, полученных по кернам станций Восток, Конкордия и

Купол Фуджи, показало, что наклон этой зависимости, т.е. скорость роста гидратов в древнем льду, варьирует в относительно узком диапазоне (5,1–6,2 мкм/100 тыс. лет). Последнее свидетельствует о близости эффективных температур роста гидратов в различных районах Восточной Антарктиды. С учётом вновь полученных данных неопределённость сделанной нами оценки максимального возраста льда в керне ст. Восток не должна превышать  $\pm 0,17$  млн лет.

Наконец, недавно «гидратная» датировка ледяного керна со ст. Восток была подтверждена результатами изотопного датирования, выполненного по содержанию космогенного изотопа криптон-81 в экстрагированном из льда воздухе (материал готовится к публикации). Новые свидетельства в пользу древнего возраста атмосферного льда в «восточном» керне повышают актуальность реализации проекта VOICE. По нашему мнению, целесообразно пробурить новый боковой ствол глубокой скважины на ст. Восток с глубины примерно 3300 м для получения непрерывного ледяного керна, который позволит исследовать строение и состав древней ледяной породы и заключённого в ней атмосферного воздуха с высоким разрешением по глубине и возрасту.

Наличие льда возрастом более 1 млн лет под ст. Восток означает, что в районе Ледораздела В, откуда берёт начало линия тока льда, проходящая через скв. 5Г (рис. 2), может залежать ещё более древний антарктический лёд с ненарушенной

стратиграфией. Поэтому с целью детального исследования района Купола В и определения наиболее подходящего места для реализации нового проекта глубокого бурения антарктического ледника весьма актуален комплексный гляцио-геофизический поход на Ледораздел В (см. рис. 2). Программа походных исследований должна предусматривать: радарное профилирование снежной и ледяной толщ ледника по маршруту похода и в районе ледораздела; измерение скорости и направления движения льда; определение изотопного состава и скорости аккумуляции снега; бурение неглубокой скважины на ледоразделе с последующим исследованием керна. Полученные данные будут использованы для моделирования распределений возраста льда по глубине на разных участках ледника вблизи ледораздела [5, 12]. Активизация работы российских гляциологов и буровиков в указанных направлениях обеспечит достойное место отечественному антарктическому научному сообществу в складывающейся системе национальных и международных проектов исследования древнейшего льда планеты, которые будут занимать центральное место в антарктических программах в ближайшие 15–20 лет.

**Благодарность.** Исследования финансируются по гранту РФФИ 18-17-00110.

**Acknowledgement.** The research is financially supported by the Russian Science Foundation, grant 18-17-00110.

## Литература

1. Kennicutt II M.C., Chown S.L., Cassano J.J., and 70 others. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond // *Antarctic Science*. 2014. P. 1–16. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0954102014000674>.
2. Электронный ресурс: <http://www.pages-igbp.org/ini/end-aff/ipics>.
3. Fischer H., Severinghaus J., Brook E., Wolff E., Albert M., Alemany O., Arthern R., Bentley C., Blankenship D., Chappellaz J., Creyts T., Dahl-Jensen D., Dinn M., Frezzotti M., Fujita S., Gallee H., Hindmarsh R., D. Hudspeth D., Jugie G., Kawamura K., Lipenkov V., Miller H., Mulvaney R., Parrenin F., Pattyn F., Ritz C., Schwander J., Steinhage D., van Ommen T., Wilhelms F. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS «Oldest-Ice» ice core // *Climate of the Past*. 2013. V. 9. P. 2489–2505.

## References

1. Kennicutt II M.C., Chown S.L., Cassano J.J., and 70 others. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond. *Antarctic Science*, 2014: 1–16. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0954102014000674>.
2. Electronic resource: <http://www.pages-igbp.org/ini/end-aff/ipics>.
3. Fischer H., Severinghaus J., Brook E., Wolff E., Albert M., Alemany O., Arthern R., Bentley C., Blankenship D., Chappellaz J., Creyts T., Dahl-Jensen D., Dinn M., Frezzotti M., Fujita S., Gallee H., Hindmarsh R., D. Hudspeth D., Jugie G., Kawamura K., Lipenkov V., Miller H., Mulvaney R., Parrenin F., Pattyn F., Ritz C., Schwander J., Steinhage D., van Ommen T., Wilhelms F. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS «Oldest-Ice» ice core. *Climate of the Past*. 2013, 9: 2489–2505.

4. Higgins J.A., Kurbatov A.V., Spaulding N.E., Brook E., Introne D.S., Chimiak L.M., Yan Y., Mayewski P.A., Bender M.L. Atmospheric composition 1 million years ago from blue ice in the Allan Hills, Antarctica // PNAS. 2015. V. 112 (22). P. 6887–91.
5. Parrenin F., Cavitte M.G.P., Blankenship D.D., Chappellaz J., Fischer H., Gagliardini O., Masson-Delmotte V., Passalacqua O., Ritz C., Roberts J., Siegert M.J., and Young D.A. Is there 1.5-million-year-old ice near Dome C, Antarctica // The Cryosphere. 2017. V. 11. P. 2427–2437. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2427-2017>, 2017.
6. Karlsson N.B., Binder T., Eagles G., Helm V., Pattyn F., van Liefferinge B., Eisen O. Glaciological characteristics in the Dome Fuji region and new assessment for 1.5 Ma old ice // The Cryosphere Discuss. 2017. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-258>.
7. Lipenkov V.Ya., Raynaud D. The Mid-Pleistocene Transition and the Vostok Oldest Ice Challenge // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 95–106. doi: <http://dx.doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-95-106>.
8. Цыганова Е.А., Липенков В.Я. Рост воздушных гидратов и возраст придонного льда в Центральной Антарктиде // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 5–12.
9. Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Hondoh T. Air-hydrate crystal growth in polar ice // Journ. of Crystal Growth. 2003. V. 257. P. 412–426.
10. Uchida T., Miyamoto A., Shin'yama A., Hondoh T. Crystal growth of air hydrates over 720 ka in Dome Fuji (Antarctica) ice cores: microscopic observations of morphological changes below 2000 m depth // Journ. of Glaciology. 2011. V. 57 (206). P. 1017–1026.
11. Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Raynaud D. Growth of air-hydrate crystals and the maximum age of ice in the basal strata of East Antarctic Ice Sheet near Vostok Station // International Partnership in Ice Core Sciences. Abstract of First Open Science Conference 1–5 October 2012. Presque'île de Giens. France, 2012. P. 120.
12. Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Ya. Ice flow line modeling in ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica). Physics of ice core records / Ed. T. Hondoh. Sapporo: Hokkaido University Press, 2009, 2: 167–194.
13. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A. Spatial distribution of the snow accumulation rate along the ice flow lines between Ridge B and Lake Vostok // Лёд и Снег. 2012. № 4 (120). С. 122–128.
4. Higgins J.A., Kurbatov A.V., Spaulding N.E., Brook E., Introne D.S., Chimiak L.M., Yan Y., Mayewski P.A., Bender M.L. Atmospheric composition 1 million years ago from blue ice in the Allan Hills, Antarctica. PNAS. 2015, 112 (22): 6887–91.
5. Parrenin F., Cavitte M.G.P., Blankenship D.D., Chappellaz J., Fischer H., Gagliardini O., Masson-Delmotte V., Passalacqua O., Ritz C., Roberts J., Siegert M.J., and Young D.A. Is there 1.5-million-year-old ice near Dome C, Antarctica? The Cryosphere. 2017, 11: 2427–2437. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2427-2017>.
6. Karlsson N.B., Binder T., Eagles G., Helm V., Pattyn F., van Liefferinge B., Eisen O. Glaciological characteristics in the Dome Fuji region and new assessment for 1.5 Ma old ice. The Cryosphere Discuss. 2017. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-258>.
7. Lipenkov V.Ya., Raynaud D. The Mid-Pleistocene Transition and the Vostok Oldest Ice Challenge. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2015, 55 (4): 95–106. doi: <http://dx.doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-95-106>.
8. Tsiganova E.A., Lipenkov V.Ya. Growth of air hydrates and the age of ice in central Antarctica. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2011, 1 (113): 5–12. [In Russian].
9. Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Hondoh T. Air-hydrate crystal growth in polar ice. *Journ. of Crystal Growth*. 2003, 257: 412–426.
10. Uchida T., Miyamoto A., Shin'yama A., Hondoh T. Crystal growth of air hydrates over 720 ka in Dome Fuji (Antarctica) ice cores: microscopic observations of morphological changes below 2000 m depth. *Journ. of Glaciology*. 2011, 57 (206): 1017–1026.
11. Lipenkov V.Ya., Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Raynaud D. Growth of air-hydrate crystals and the maximum age of ice in the basal strata of East Antarctic Ice Sheet near Vostok Station. *International Partnership in Ice Core Sciences. Abstract of First Open Science Conference 1–5 October 2012. Presque'île de Giens. France, 2012: 120 p.*
12. Salamatin A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Ya. Ice flow line modeling in ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica). *Physics of ice core records*. Ed. T. Hondoh. Sapporo: Hokkaido University Press, 2009, 2: 167–194.
13. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A. Spatial distribution of the snow accumulation rate along the ice flow lines between Ridge B and Lake Vostok. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, 4 (120): 122–128.