

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ЯНВАРЯ 2005 г. ПО ДАННЫМ GOMOS/ENVISAT

канд. физ.-мат. наук С.В.ВЕРЕТЕНЕНКО¹, д-р физ.-мат. наук Л.С.ИВЛЕВ²,
н.с. В.А.УЛЬЕВ³

¹ – Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, svetaveretenenko@mail.ru,

² – Санкт-Петербургский государственный университет, НИИ физики им. В.А.Фока, г. Санкт-Петербург, lev@aero.phys.spbu.ru,

³ – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, vauliev@yandex.ru

Проведен анализ результатов наблюдений концентрации стратосферного аэрозоля в январе 2005 г. по данным инструмента GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars), установленного на спутнике ENVISAT. Обнаружено заметное увеличение аэрозольной концентрации в высоких широтах (72° с.ш.) после начала серии солнечных протонных событий 15–17 января, сопровождавшихся возрастанием потока частиц в диапазоне 165–500 МэВ, и 20 января Ground Level Enhancement (GLE). Наблюдаемые вариации содержания аэрозоля сопоставлены с изменениями скорости ионизации в нижней стратосфере. Показано, что увеличение аэрозольной концентрации может быть обусловлено влиянием изменений скорости стратосферной ионизации на формирование и рост аэрозольных частиц.

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, протоны солнечных космических лучей, скорость ионизации

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве одного из возможных механизмов влияния солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы, погоду и климат рассматриваются изменения радиационно-теплового баланса атмосферы вследствие изменений прозрачности атмосферы в видимом и инфракрасном диапазоне (напр., [1]). Предполагается, что причиной изменений прозрачности могут быть вариации состояния облачности и/или аэрозольных характеристик (концентрации и размеров аэрозольных частиц) вследствие изменений скорости ионизации в стратосфере/верхней тропосфере, обусловленных вариациями потока солнечных и галактических космических лучей с энергиями $\sim 0,1$ – несколько ГэВ.

Влияние различных гелио-геофизических факторов на образование аэрозолей исследовалось в работах [1, 2, 5] с использованием данных лидарных наблюдений. В настоящей работе приводятся результаты наблюдений аэрозольной концентрации (АК) во время мощных солнечных протонных событий (СПС) 15, 16 и 17 января 2005 г., сопровождавшихся возрастанием потока частиц в диапазоне 165–500 МэВ, а также 20 января (GLE) по данным инструмента GOMOS.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) представляет собой спектрометр, установленный на борту спутника Европейского космического агентства ENVISAT, запущенного в марте 2002 г. Принцип работы GOMOS –

измерения спектра звездного излучения при заходе звезды в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн. GOMOS позволяет восстанавливать вертикальные профили концентраций озона и других малых составляющих атмосферы, а также аэрозольной экстинкции. Измерения охватывают диапазон высот от ~5–10 км до 100 км, вертикальное разрешение составляет ~2 км [4]. Для анализа использовались наблюдения самой яркой звезды, Сириуса, так как они имеют наилучшую точность.

Данные наблюдений обнаружили заметное увеличение АК в нижней стратосфере/верхней тропосфере на широте 72° с.ш. во второй половине января 2005 г., наиболее четко выраженное на высотах 10–12 км и сопровождавшееся понижением температуры выше области формирования аэрозольного слоя (рис. 1). Для устранения возможного вклада циркумполярного вихря, из анализа исключались

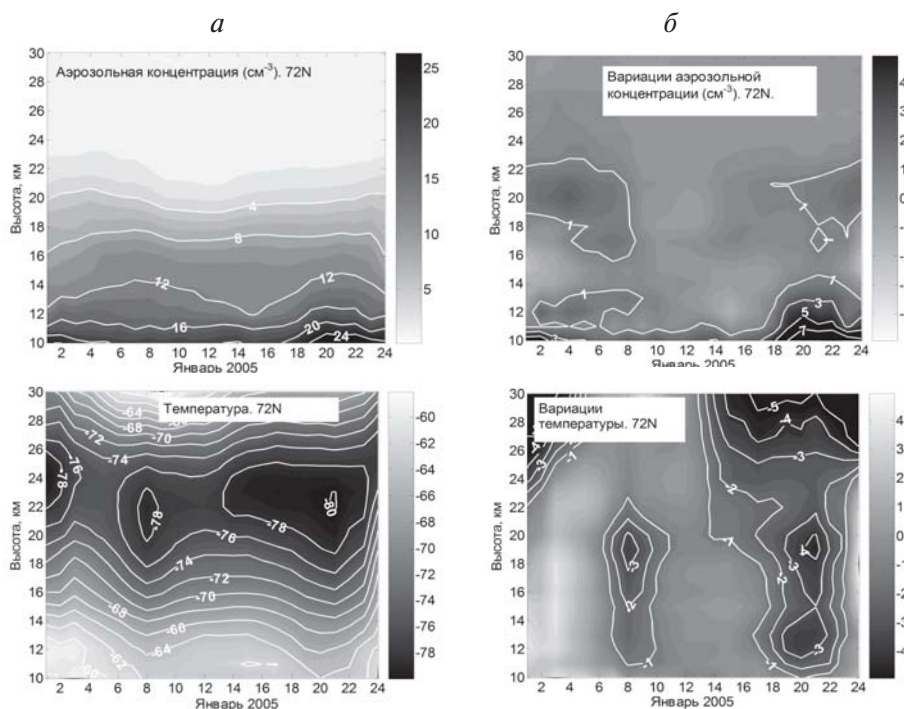


Рис. 1. Временной ход аэрозольной концентрации (см^{-3}) и температуры ($^{\circ}\text{C}$) (а) и их вариаций (отклонений от медианных значений на интервале 10–14.01.2005) (б) в январе 2005 г. Широта 72° с.ш., области долгот 180° з.д. – 100° з.д. и 20° з.д. – 100° в.д.

области повышения циклонической завихренности над северной частью Канады и Восточной Сибирью.

Как показывают данные на рис. 1 и 2, изменение АК во время событий 15–17 января наблюдалось в диапазоне высот 10–22 км и имело 2 максимума: на 10 км (отклонения от медианных значений ~4–7 см^{-3}) и на 16–20 км (~1–2 см^{-3}). Последний совпадает с областью высот, которую могут достигать частицы с энергиями 165–500 МэВ, и аэрозольным слоем Юнге, состоящим из микрокапелек серной кислоты. Следует отметить, что наиболее заметное возрастание АК на более низких высотах (10–12 км) наблюдалось после 17 января. После 20.01 (GLE) аэрозольная концентрация возрастала на 18–22 км (до 2 см^{-3}) и на 10–12 км (до 10 см^{-3}).

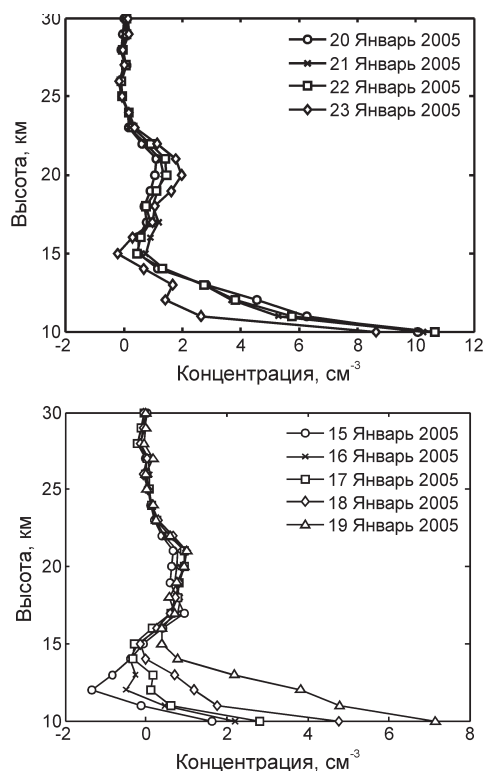


Рис. 2. Вертикальные профили вариаций аэрозольной концентрации после начала протонных событий. Широта 72° с.ш., области долгот 180° з.д. – 100° з.д. и 20° з.д. – 100° в.д.

Сопоставим наблюдаемые изменения аэрозольной концентрации с изменениями скорости ионизации в высокоширотной атмосфере. Скорость ионобразования рассчитывалась численным методом. В основу алгоритма расчета положена формула скорости потери энергии заряженной частицей (протоном) при проникновении в атмосферу на высотах 10–90 км. Приняты следующие допущения: 1) магнитные силовые линии вертикальны; 2) поверхность ионосферы плоская; 3) отсутствует поток альбедо. Такие допущения оправданы для расчетов скорости ионобразования в высоких широтах. Результаты расчетов дополнительной ионизации в связи с исследуемыми СПС приведены на рис. 3.

Расчеты показали, что в ходе СПС 15 и 16 января скорость дополнительной ионизации на высотах 15 и 20 км была незначительна и составляла $\sim 0,2\text{--}0,4$ и $\sim 1,3\text{--}2,5 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ соответственно. Существенное повышение скорости дополнительной ионизации произошло в связи с СПС 17 января: до $\sim 8 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ на 15 км и $\sim 90 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ на 20 км (рис. 4). После GLE 20 января скорость ионизации на данных высотах возросла на 3 порядка.

Сопоставление данных на рис. 1–3 показывает, что увеличение аэрозоля на высотах ~ 20 км началось после 15.01 и заметно усилилось после 20.01. На более низких высотах (10–14 км) резкое увеличение АК наблюдается после события 17.01, более мощного по сравнению с предыдущими событиями 15.01 и 16.01. Таким образом, вышеприведенные данные позволяют предположить, что наблюда-

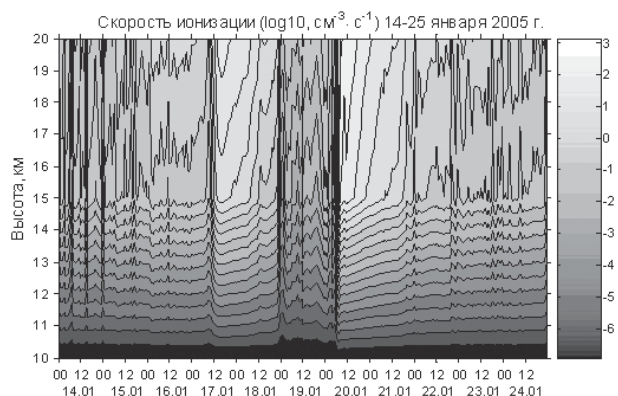


Рис. 3. Временной ход скорости дополнительной ионизации в январе 2005 г. для высокоширотной атмосферы (широта 72° с.ш., долгота 0° в.д.)

емые изменения аэрозольной концентрации в значительной степени могут быть обусловлены изменениями скорости ионизации в стратосфере в связи с исследуемыми протонными событиями. Это согласуется с данными [2, 5], свидетельствующими об увеличении содержания стратосферного аэрозоля после мощных СПС. Возможной причиной усиления АК на 20 км может быть также формирование полярных стратосферных облаков, поскольку в этот период наблюдалось понижение температуры до -78°C .

Увеличение аэрозольной концентрации в связи с увеличением скорости ионизации может быть обусловлено как «ion-mediated nucleation», так и электрическими механизмами [6]. В первом из них («ion-mediated nucleation») предполагается, что конденсация на заряженных молекулярных кластерах серной кислоты и воды приводит к образованию новых аэрозольных частиц, которые при определенных условиях могут достичь размеров облачных ядер конденсации (0,1–1 мкм). Данный механизм непосредственно зависит от скорости ионизации атмосферы потоками космических лучей. Усиление аэрозольного слоя в области высот 15–20 км, которую могут достигать частицы с энергиями 165–500 МэВ, по-видимому, может быть обусловлено указанным механизмом. Электрические механизмы («electrofreezing», «electroscavenging») предполагают влияние вариаций космических лучей, а также

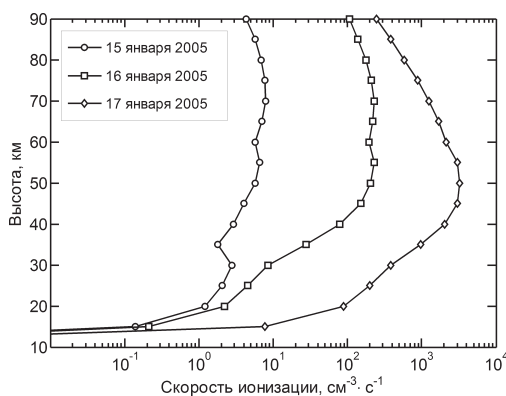


Рис. 4. Профили скорости дополнительной ионизации в высокоширотной области (широта 72° с.ш., долгота 0° в.д.) для событий 15, 16 и 17 января 2005 г. в максимумах потока частиц

локального ионосферного потенциала на величину атмосферного тока, создающего начальную электризацию облака, которая в свою очередь влияет на величину электростатического заряда аэрозольных частиц и водяных капелек. Наличие электрических зарядов способствует более эффективному собиранию аэрозольных частиц падающими облачными каплями («electroscavenging»). Результатом данного процесса может быть увеличение скорости образования ледяных частиц в облаках, состоящих из переохлажденной воды [6]. Электрический механизм может способствовать формированию аэрозолей на более низких высотах, где изменения скорости ионизации невелики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного исследования обнаружили увеличение аэрозольной концентрации в стратосфере на высотах 10–12 и 15–20 км во время солнечных протонных событий января 2005 г. Предполагается, что возможной причиной наблюдаемых эффектов является увеличение скорости ионизации в связи с исследуемыми событиями.

Авторы благодарят В.Ф. Софиеву (Финский метеорологический институт) и the GOMOS team (Финский метеорологический институт, Service d'Aeronomie, France, IASB, Belgium, ACRI-ST, France, ESA/ESRIN, Italy, ESA/ESTEC, Netherlands) за предоставленные данные. Работа поддержана программой Президиума РАН № 16 «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маричев В.Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44. С. 841–848.
2. Миронова И.А., Пудовкин М.И. Увеличение содержания аэрозоля в нижней атмосфере после протонных вспышек на Солнце в январе и августе 2002 г. по данным лидарных наблюдений в Европе // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. С. 234–240.
3. Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрномия. 1992. Т. 32. С. 1–22.
4. Kyrölä E. et al. GOMOS on Envisat: an overview // Adv. Space Res. 2004. V. 32. P. 1020–1028.
5. Shumilov O.I. et al. Enhancement of stratospheric aerosols after solar proton events // Ann. Geophysicae. 1996. Vol. 14. P. 1119–1123.
6. Tinsley B.A. and Yu.F. Atmospheric ionization and clouds as links between solar activity and climate // Solar variability and its effects on the Earth's atmosphere and climate system. Ed. by J. Pap et al. AGU Press. Washington, 2004. P. 321–339.

S.V.VERETENENKO, L.S.IVLEV, V.A.ULIEV

RESEARCH OF STRATOSPHERIC AEROSOL VARIATIONS DURING SOLAR PROTON EVENTS OF JANUARY 2005 ACCORDING TO THE DATA OF GOMOS/ENVISAT

The analysis of results of registration of stratospheric aerosol concentration in January, 2005 according to tool GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) established on Envisat satellite is carried out. The appreciable increase in aerosol concentration at high latitudes (72°N) after the beginning of series of solar proton events on January, 15–17th and on January, 20th, accompanied by increase of solar protons in an energy range of 165–500 MeV (on January, 20th it is registered GLE) is revealed. Model calculations of change of ionization rate in the bottom stratosphere under the influence of solar protons are spent. It is shown that the increase in aerosol concentration can be caused by influence of increase of stratospheric ionization rate on formation and growth of aerosol particles.

Keywords: stratospheric aerosol, protons of solar cosmic rays, ionization rate.

ОСОБЕННОСТИ МОРФОМЕТРИИ ТОРОСИСТЫХ ОБРАЗОВАНИЙ СО СМЕЩЕННЫМИ ПАРУСОМ И КИЛЕМ

канд. физ.-мат. наук В.В.ХАРИТОНОВ, вед. программист А.Э.КЛЕЙН,
канд. геогр. наук Р.Б.ГУЗЕНКО

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, aaricoor@aari.nw.ru

Традиционно считается, что для гряд, образовавшихся при торошении ровного льда, характерна правильность геометрической формы паруса и киля, причем парус тороса несколько смещен относительно киля. Во время высадки дрейфующих станций «Северный полюс-34» и «Северный полюс-36» проводились исследования морфометрических характеристик ровного льда и торосов с помощью бурения. Были обнаружены два тороса, киль которых был полностью смещен относительно паруса. Приведены основные морфометрические характеристики этих торосов. Рассмотрен опыт использования подводного телеметрического комплекса для наблюдений за нижней поверхностью льда.

Ключевые слова: парус тороса, киль тороса, термобурение, подводный телеметрический комплекс

Традиционно считается, что для гряд, образовавшихся при торошении ровного льда, характерна правильность геометрической формы паруса и киля [2]. В практике расчетов ледовых нагрузок торосистых образований на опоры ледостойких платформ чаще всего используется модель тороса, в которой парус и киль имеют правильную треугольную форму [1]. Анализ информации о форме парусов и килей торосов показал их сложное строение. Очень часто одна гряда торосов переходит в другую, одному парусу нередко соответствуют два киля или, наоборот, одному килю — два паруса. Однако треугольную модель тороса можно использовать с учетом того, что в большинстве случаев парус тороса несколько смещен относительно киля. По данным авторов статьи, точка с максимальным парусом может быть смещена относительно точки с максимальным килем на расстояние до 15 м, в среднем на 4–4,5 м.

Во время высадки дрейфующих станций «Северный полюс-34» и «Северный полюс-36» проводились исследования морфометрических характеристик ровного льда и торосов, находившихся в районе высадки и на льдине-носителе станции. Эти исследования производились с помощью мотобура и установки для электротермобурения с записью скорости бурения на компьютер. Геометрия торосов и их внутреннее строение определяются в результате обработки записей термобурения. Эта процедура достаточно известна и описана во многих предыдущих статьях, например [4, 5] и др. Технология защищена Патентом России № 2153070, 2000 г. [3]. Скорость бурения зависит от подаваемой на термобур тепловой мощности и пористости льда. Определение расположения пустот, плотного и рыхлого льда на отрезках скважины производится по скорости погружения бура. Необходимым условием валидности этого определения является бурение скважин при постоянной тепловой мощности или учет ее изменения во время бурения. В рыхлом льду и пустотах движение термобура резко ускоряется. Дополнительно измеряется расстояние от поверхности снега (льда) до

уровня моря. При обработке данных бурения определяются величина надводной и подводной части ледяного покрова, границы консолидированного льда торосов, границы пустот, участки льда различной пористости.

Для наблюдений за нижней поверхностью льда использовался подводный телеметрический комплекс (ПТК). Основной и единственной задачей на момент разработки ПТК в 2004 г. являлась регистрация по вмороженной рейке нарастания толщины льда подо льдом без бурения скважин. Однако в процессе эксплуатации были получены информативные материалы, показывающие, что ПТК может эффективно использоваться для долговременных наблюдений за биотой подо льдом и определения геометрических размеров блоков льда, составляющих киль тороса. Для упрощения и облегчения работ по подводной съемке был собран и апробирован в полевых условиях мобильный пульт управления подводной телекамерой. Для его подключения и приведения в рабочее состояние требуется всего лишь подключение поста к электропитанию и коммутация нескольких проводов, идущих от ПТК. Проведенные ранее испытания показали, что пульт может эксплуатироваться в любых метеоусловиях. Развертывание комплекса на льду производится одним человеком и занимает не более 15 мин. Для погружения подводного блока (камера + прожектор) под лед нужна скважина диаметром не менее 250 мм и несколько контрольных скважин для погружения реперной мерной рейки.

В соответствии с программой работ ледоисследовательского отряда экспедиции «Арктика-2005» предполагалось исследовать ровный лед. Однако уже первые пробуренные скважины на судовой ледовой станции показали, что выбранное ледяное поле является обломком гряды торосов на двухлетнем льду со смещенным под ровную часть льдины килем. Высота паруса этого ледяного образования составляла по визуальной оценке от 1 до 1,5 м, глубина киля по данным механического бурения – 4,6 м. К сожалению, недостаток времени не позволил провести более детальное исследование этого ледяного образования.

В сентябре 2008 г. среди исследованных торосов один выделялся своими морфометрическими характеристиками. Он располагался на краю льдины и, единственный из всех рассматриваемых близлежащих торосов, имел парус, сложенный из отдельных блоков льда. Все остальные торосы были многолетними с сильно сглаженными парусами, полностью занесенными снегом. На торосе было пробурено 12 скважин с записью скорости бурения на компьютер и еще несколько дополнительных скважин мотобуром на окружающем торос ровном льду. Проводилось измерение габаритных размеров блоков, составляющих парус тороса, а также визуальные наблюдения за килем тороса с помощью ПТК. Телекамера на штангах от керноотборника «Kovacs» последовательно опускалась на глубину 2, 3 и 4 м. Общие затраты времени на развертывание комплекса, включая бурение скважин, составили один час.

Профиль тороса № 2, полученный в результате термобурения, представлен на рис. 1. Масштаб по оси X и по оси Y одинаков. В скважине 4 на дистанции 9,6 м зафиксирован провал длиной 2,5 м. Пунктирная линия обозначает вероятную границу киля тороса на этой дистанции. Как видно из рисунка, киль тороса существенно смещен относительно паруса. В точках бурения 4–6 зафиксирована максимальная осадка киля этого ледяного образования, составляющая 7,8–8,3 м. Причем за исключением провала в скважине 4 в этой части киля больше не отмечено пустот, коэффициент заполнения равен единице.

Это ледяное образование явилось результатом торошения ровного однолетнего льда, наслоившегося на многолетний торос и притопившего его таким образом, что парус вновь образовавшегося тороса оказался сложенным из блоков однолетнего льда, а киль практически полностью смороженным. Среднее значение толщины блоков льда, составляющих парус тороса, составляет 0,53 м, длины – 1,73 м, ширины – 1,10 м.

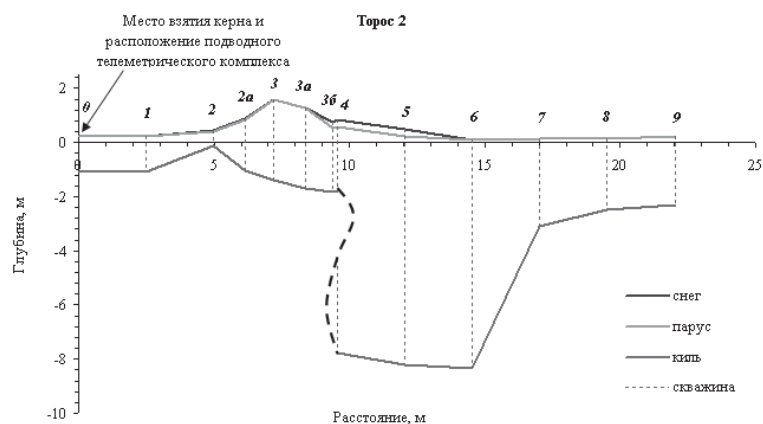


Рис. 1. Профиль бурения тороса № 2.

Масштаб по оси X и по оси Y одинаков. Цифрами сверху обозначены номера скважин. В скважине 4 на дистанции 9,6 м зафиксирован провал длиной 2,5 м. Пунктирная линия обозначает вероятную границу кия на этой дистанции

Исходя из морфометрических параметров, можно предположить следующий генезис этого ледяного образования. Большой киль этого тороса был частью многолетнего тороса, располагающегося на краю льдины. Причем киль также был смещен относительно паруса тороса. Вероятно, в результате динамики часть льдины, на которой преимущественно находился парус тороса, была отколота и унесена течением или под действием ветра. Оставшаяся часть кия, подвергаемая архимедовой силе, но прочно смерзшаяся с окружающим ровным льдом (толщина которого к сентябрю 2008 г. достигла толщины 2,5–2,6 м), была зафиксирована и не смогла преодолеть его сопротивление, оставшись в подводном положении. Этому способствовало замерзшее вскоре разводье. Впоследствии образовавшийся в разводье лед выторосился на край оставшегося многолетнего тороса, образовав парус и небольшой киль. Косвенным признаком этого может служить значение толщины льда на краю гребня тороса в точке бурения 2, равное 0,54 м. К тому же большая часть блоков льда, составляющих парус тороса, имеет толщину 0,45–0,53 м.

Основные морфометрические характеристики торосов приведены в табл. 1.

Общий вид кия данного торосистого образования, полученный с помощью ПТК, представлен на рис. 2. Прозрачность воды была достаточно высока и не являлась препятствием для проведения подводной телесъемки. Освещенность подо льдом толщиной 1,5–2 м достаточна для проведения измерений на расстоянии до 10 м от камеры даже в ночное время. Жесткое крепление подводной телекамеры на штанге оказалось оправданным, т.к. обеспечило стабильность ее положения при съемке. В дальнейшем для работы ПТК в мобильном варианте во избежание потери информации при неожиданном прекращении электропитания необходимо

Таблица 1

Морфометрические характеристики исследованных торосов

Параметр	Торос 1	Торос 2
Максимальная толщина льда, м	5,49	8,72
Максимальная высота паруса, м	1,5	1,60
Максимальная глубина кия, м	4,6	8,34
Соотношение «максимальный киль / максимальный парус»	3–4,5	5,2
Углы ската паруса, градусы	–	28,4–21,1

использовать специализированный портативный компьютер, в состав которого входит встроенный источник бесперебойного питания.

Проведенные исследования позволили получить новые данные о морфометрии ледяного покрова центральной части Арктического бассейна. В заключение можно сделать следующие выводы:

— особенности строения рассмотренных торосов состоят в том, что кили данных торосистых образований полностью смещены относительно парусов, причем торос № 2 можно предположительно классифицировать как торос с однолетним парусом и многолетним килем;



Рис. 2. Общий вид кили тороса № 2:

a — на снимке хорошо видна ниша в киле тороса. На переднем плане размеченный кабель с грузом на конце, опущенный в скважину для оценки размеров блоков льда в киле тороса; *б* — снимок отображает полностью смороженный киль тороса. Невозможно выделить ни одного блока льда, составляющего киль тороса. На переднем плане шнек мотобура после окончания бурения скважины

– значительное смещение паруса и киля определяется в первую очередь возрастом торосистого образования, т.к. высокая степень его консолидации предохраняет торос от разрушения при сжатии и торосообразовании на его краях;

– крайне важно с точки зрения получения дополнительной информации о киле торосистого образования использовать термобурение в комплексе с ПТК. Альтернативой существующей системе подводной телевизионной съемки с помощью неподвижной камеры на штанге является подводный телеуправляемый аппарат (ПТА), позволяющий выполнять подводную съемку на совершенно ином качественном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа / Под ред. О.Е.Литонова и В.В.Панова. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 360 с.
2. Грищенко В.Д. Морфометрические характеристики гряд торосов на льдах Арктического бассейна // Тр. ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 46–55.
3. Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент на изобретение № 2153070 от 20.07.2000. Бюллетень № 20.
4. Morev V.A., Kharitonov V.V. Definition of the Internal Structure of Large Ice Features by Thermal Drilling Methods. Proc. of the 16th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition. POAC' 01. Aug. 12–17, 2001. Ottawa, Ontario, Canada. Vol. 3. P. 1465–1472.
5. Kharitonov V.V. Peculiarities of Fractional Composition of the Pechora Sea First-Year Ridges // Proc. of the 18th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Potsdam, New York, 26–30 June 2005. Vol. 2. P. 907–916.

V.V.KHARITONOV, A.E.KLEYN, R.B.GUZENKO

PECULIARITIES OF MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF ICE RIDGES WITH SAIL AND KEEL DISPLACED

It is traditionally considered that sails and keels of ice ridges formed from level ice have the regular geometrical shape. Usually, the sail of an ice ridge is somewhat displaced relative to the keel. During building the drifting stations «NP–34» and «NP–36», the morphometric characteristics of level ice and ice ridges were researched using the method of drilling. Two ice ridges with keels completely displaced relative to the sails have been found. The main morphometric characteristics of these ice ridges are presented. Experience of using the submersible telemetric complex for observing the lower ice surface is discussed.

Keywords: Ice ridge sail, ice ridge keel, thermal drilling, submersible telemetric complex.