

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ТОРОСОВ ПРОЛИВА ШОКАЛЬСКОГО

В период с апреля по май 2016 года на стационаре «Ледовая база «Мыс Баранова»» работала группа термобурения отдела ледового режима и прогнозов ААНИИ. В состав группы входили: канд. физ.-мат. наук В.В. Харитонов, ведущие инженеры Р.А. Савин и Г.А. Дешевых. Подготовка и организация сезонной работы группы была обеспечена Высокоширотной арктической экспедицией (ВАЭ) ААНИИ. Основной целью исследований являлось получение информации о морфометрических характеристиках ледяных торосистых образований пролива Шокальского.

Группе термобурения была определена следующая задача — проведение инструментальных наблюдений за морфометрическими характеристиками торосов. Эти наблюдения включают в себя: запись скорости бурения торосов на логгер, оценки углов ската торосов, определения геометрической формы торосов, высоты паруса и глубины киля, линейной пористости как отношения суммы вертикальных размеров пустот по всем скважинам к сумме длин всех скважин, геометрических размеров блоков, из которых сложены торосы, высоты снежного покрова на поверхности торосов и толщины ровного льда (рядом с торосом).

Поиск подходящих объектов исследования, а именно торосов, был предварительно произведен группой ледоисследователей, работающих на базе, во главе с начальником базы В.А. Бородкиным. За это им огромная благодарность. Поиск был осложнен тем, что большая часть прилегающего к стационару припая представляла собой восторщенный лед с высотой парусов, не превышающей 1–1,5 метров. Крупных торосов не было, и большая удача, что удалось обнаружить несколько торосов с высотой паруса более двух метров, которые и были выбраны для исследования.

На удалении пяти километров от базы на припайном льду был разбит полигон, включающий в себя три торосистых образования, а также ровный и наслоенный лед. Толщина ровного льда варьировала от одного до двух метров. Все три тороса располагались примерно на одной линии на расстоянии 570 и 700 м друг от друга.

Водяное бурение производится с помощью установки водяного бурения льда УВБЛ, разработанной и изготовленной в ААНИИ. Преимуществом водяного бурения является высокая производительность за счет высокой скорости бурения. Для

работы установки используется электрогенератор мощностью 3 кВт, потребляющий 1,3 л бензина в час. Котел установки работает на дизельном топливе и потребляет 7 л в час. Система после работы заполняется антифризом, потребление которого в сильные морозы доходит до 5 л/день. Недостатками установки являются большой вес и длительное время на подготовку ее к работе. Средняя скорость бурения плотного льда составляет 2–4 см/с.

В начале апреля морозы на мысе Баранова стояли за минус тридцать, поэтому насосы водоподогревателя УВБЛ начали капризничать, однако после проведенных профилактических мероприятий заработали в штатном режиме.

11 апреля 2016 года бурением на торосе №1 первых пятнадцати скважин с записью скорости на логгер началась почти двухмесячная работа по исследованию строения торосов пролива Шокальского. Доставку персонала к месту работы взяла на себя транспортная служба стационара, оборудование оставляли на льду в укрытии.

Морфометрические характеристики торосов и их внутреннее строение определяются в результате обработки записей термобурения. Эта процедура достаточно известна и описана во многих статьях. Скорость бурения зависит от подаваемой на термобур тепловой мощности, пористости льда и в небольшой степени от его температуры. 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 изменения мощности во время бурения. На участках рыхлого льда и особенно в пустотах, заполненных снегом, шугой, водой или воздухом, движение термобура резко ускоряется. Дополнительно измеряется расстояние от поверхности снега (льда) до уровня моря. При обработке данных термобурения определяются величина надводной и подводной части ледяного покрова, границы консолидированного слоя (КС) торосов, границы пустот, участки льда различной пористости.

С целью выяснения методических вопросов было выполнено комплексное исследование одного из торосов. На нем были проложены восемь секущих линий поперек его гребня, вдоль которых через 0,25 м бурились скважины. На краях линий, где консолидация тороса достигла 100 %, бурение произ-

Остров Большевик. Звездочкой показано расположение исследованных торосов.



Наиболее крупный торос №1 с парусом высотой 3,4 м.
Фото В.А. Бородкина.





Бурение и измерение превышения льда над уровнем моря.
Фото С.В. Хотченкова.

водилось через 0,5–1 м. В центральной части тороса расстояние между линиями составляло два метра. На втором и третьем торосах было проложено по одному секущему профилю. В каждой точке измерялась толщина снежного покрова и превышение поверхности льда над уровнем моря. На первом торосе специалистами по физико-механическим свойствам льда, работающими на базе, дополнительно было выполнено исследование прочности льда с помощью скважинного зонд-индентора. Также специалистами отдела ледового режима и прогнозов С.В. Хотченковым и Р.Б. Гузенко было выполнено визуальное исследование нижней поверхности тороса с помощью телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) «ГНОМ» и гидролокатора. Была также выполнена геодезическая съемка верхней поверхности тороса. На всех трех торосах были взяты керны для исследования текстуры и структуры льда.

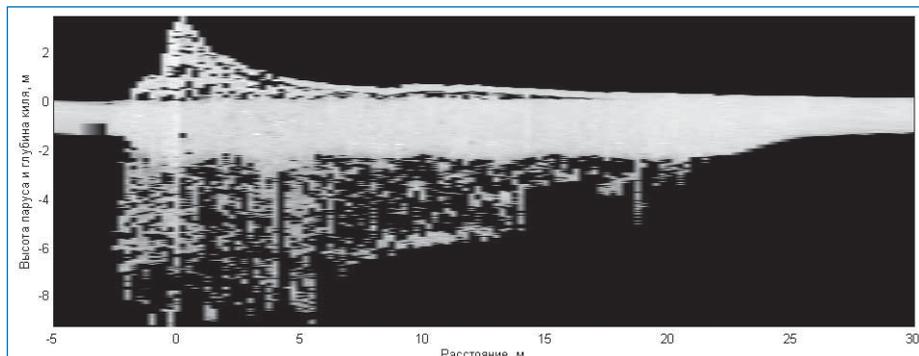
Термобуровые работы с несколькими перерывами на непогоду продолжались до конца мая. Всего было пробурено 1267 скважин (с записью скорости бурения на логгер) общей глубиной более 6080 м. Средняя глубина скважины составила около 5 м. Дополнительно выполнялось бурение ровного льда на полигоне вблизи стационара, где была пробурена 91 скважина, а также фиксировалась скорость бурения.

Таким образом, за период весеннего полевого сезона 2016 года был получен большой объем новых натуральных данных о строении ледяного покрова в районе пролива Шокальского.

Судя по толщине блоков, составляющих паруса торосов, их возраст не превышает нескольких месяцев. Более точно его можно оценить, проведя необходимые расчеты с учетом данных о температуре воздуха в зимний период. Толщина блоков третьего тороса несколько больше, чем на первых двух, и анализ покажет, повлияло ли это обстоятельство на его строение.

В 2016 году исследования торосов явились логическим продолжением работ, начатых на дрейфующей станции «Се-

Профиль поперечного сечения тороса №1.



верный полюс-38», когда в результате нового подхода к исследованию внутреннего строения торосов были впервые получены картинки профилей их поперечного сечения, образно названные «рентгеновскими снимками».

Согласно закону сохранения энергии, скорость термобурения обратно пропорциональна объемному содержанию твердой фазы льда. Таким образом, построив зависимость обратной скорости от глубины, получим распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине в каждой точке бурения. В этом году точки бурения располагались на расстоянии преимущественно 0,25 м друг от друга. Далее строится сетка на множестве значений X и Y, где X — массив значений расстояния вдоль профиля (линейных координат точек бурения), а Y — массив значений отсчетов глубины на записях. На этой сетке строится поверхность объемного содержания твердой фазы льда, причем цвет узлов поверхности задается его значениями. Темный цвет соответствует пустотам, белый цвет — плотному льду. Промежуточные оттенки серого цвета соответствуют рыхлому льду.

Помимо визуализации расположения блоков льда и пустот в теле тороса такая подробная картина позволяет изучить распределение пористости тороса вдоль его поперечного сечения, проверить наличие или отсутствие закономерностей в ее распределении. К тому же восемь поперечных профилей дают информацию о возможных изменениях в строении тороса вдоль его гребня.

Первое торосистое образование было самым крупным среди исследованных во время описываемых сезонных работ. Максимальная высота паруса тороса № 1 составила 3,4 м, средняя высота — 1,7 м. Максимальная осадка киля составила 10,3 м, средняя осадка киля — 5,0 м. Снежный покров на торосе № 1 в среднем составил 0,2 м, достигая максимальной толщины 2 м. Главной отличительной особенностью данного тороса был экстремально крутой угол ската киля — около 87°. Такой крутой склон образовался явно не в процессе вторичного торосообразования, когда, например, полностью консолидированный киль тороса под действием навала льда на его край притапливается и поворачивается, и тогда склон киля может оказаться вертикальным. Складывается впечатление, что при формировании тороса блоки льда складывались аккуратной стопкой и притапливались, образуя практически вертикальную стенку. Несомненно, данный случай требует внимательного и всестороннего рассмотрения, однако можно с уверенностью констатировать обнаружение редкого случая такого формирования киля тороса.

Еще одной интересной особенностью строения тороса № 1 является наслоение ледяной пластины на уже сформировавшийся торос, к тому же покрытый снегом. В результате кернового бурения выяснилось, что провалы термобура в верхней части скважин на значительной площади у подножия паруса, показывающие наличие на этом горизонте пустоты, не совсем точно отражают действительность. Пустота на самом деле оказалась заполненной плотным снегом, сдавленным льдиной, напозвшей в результате сжатия на консолидированный слой уже существующего тороса.

Соотношения «максимальный киль/максимальный парус» исследованных торосов равнялись 3,2, 3,3 и 2,8 соответственно.

В последнее время интерес ученых, занимающихся изучением торосистых образований, смещается в сторону малоизученной, но довольно занимательной проблемы

распределения толщины консолидированного слоя внутри торосистого образования. Информацию для решения этой проблемы представляет, в частности, и наше исследование. Средняя толщина консолидированного слоя тороса № 1 составила 2,4 м, максимальная — 4,3 м, минимальная — 1,1 м. Консолидированный слой хорошо развит, имеет плоскую форму без резких изменений толщины. В отличие от первого на торосе № 2 консолидированный слой неоднороден по толщине, под парусом имеет меньшую толщину, что может быть связано с экранированием парусом и препятствием проникновению холода к килю тороса. Консолидированный слой тороса № 3 несколько меньше по толщине, чем у тороса № 1, за счет более молодого возраста и имеет выраженный прогиб под парусом.

Наблюдения за нижней поверхностью киля тороса № 1 с помощью ТПА выявили существенное различие в экстремальных значениях осадки киля. Другими словами, осадка киля не так значительна, как по данным термобурения. Необходимо отметить, что эти исследования проводились спустя месяц после начала термобуровых работ на торосе. Для проверки было пробурено несколько контрольных скважин в области максимальных значений киля. Оказалось, что в результате бурения большого количества скважин на ограниченной площади под лед попадает значительное количество подогретой воды, тем самым размывая нижние участки киля. В результате оплавления блоков льда киля некоторые перемычки, скрепляющие блоки, разрушаются, освобожденные блоки смывает подводными течениями. Уменьшение осадки киля за счет этого искусственно вызванного таяния, по нашим оценкам, достигало двух метров.

Специалисты по физико-механическим свойствам льда, связывая свои данные о прочности льда с данными термобурения, традиционно отдают предпочтение электротермобурению. Для сравнения двух методов (бурения горячей водой и электротермобурения) было выполнено тестовое бурение 11 скважин электротермобуром на торосе и ровном льду. Хотя схожесть результатов этих методов уже подтверждена ранее проведенными экспериментами, позже будет выполнен тщательный анализ полученных результатов.



Вырезка майны водяным ледорезом.
Фото В.А. Бородкина.

Помимо основной работы по исследованию строения торосов группой термобурения была произведена отработка технологии резания льда специальным водяным ледорезом с использованием штатного водоподогревателя установки УВБЛ. Этим оборудованием были приготовлены две майны в ровном льду. В одном случае это была майна для установки под лед гидролокатора, и толщина льда составляла 2,7 м, в другом — майна для океанологического оборудования во льду толщиной 1,6 м. Также в ознаменование окончания буровых работ и в качестве подарка зимовщикам в ровном льду был вырезан мини-бассейн с дном для купания в морской воде.

При выполнении работ вредного антропогенного воздействия на природную среду не выявлено.

Результаты научных исследований, выполненных в весенний сезон 2016 года группой термобурения совместно с группой ледоисследователей со стационара «Ледовая база «Мыс Баранова»», расширяют знания о ледовых условиях пролива Шокальского и вносят весомый вклад в изучение строения ледяных образований Арктики.

В.В. Харитонов (ААНИИ)

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДОЛИНЕ Р. ЛЕНЫ

Долина р. Лены, самой крупной по протяженности и водному стоку реки Сибири, стала еще одним объектом исследований в 19-й ежегодной с 1998 года российско-германской экспедиции на берега моря Лаптевых. Все эти годы главным объектом исследований была дельта р. Лены, закономерности строения и развития которой исследовались во всех проведенных экспедициях. Но дельта — результат взаимодействия реки и моря. Морские факторы достаточно широко исследованы и результаты исследований опубликованы (Большаянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты р. Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 267 с.). Но какое же значение имеет река для формирования дельты? Этот вопрос менее освещен исследованиями. Начало работам в долине р. Лены было положено в 2012 году, когда в рамках мегагранта Йорном Тиде (почетным профессором СПбГУ, бывшим директором Института полярных и морских исследований Альфреда Вегенера, Германия) был организован проект по исследованию долины величайшей реки Сибири.

Начавшийся в 2012 году проект закончился очень быстро, а денег на него практически и не было — удалось провести

лишь экспедицию в верховья реки, которая почти не дала результата, т.к. анализ материалов экспедиции не был проведен в связи с отсутствием средств на обработку полученных данных. Но осталось желание все же проникнуть в тайны истории развития реки. В 2013 году на свои средства была организована мини-экспедиция в районе Якутска и получены первые датировки Бестяхской террасы и отложений левого склона долины в районе пос. Эдейцы. Тогда сам Йорн принимал участие в экспедиции, поддержанной Институтом мерзлотоведения Сибирского отделения Академии наук в лице заместителя директора М.Н. Григорьева и доцентом Северо-восточного федерального университета О.А. Поморцевым, которые помогли добраться на правый берег реки — на Бестяхскую террасу, и вверх по левому берегу реки. В 2014 году в рамках российско-германской экспедиции удалось провести работы в низовьях реки от дельты до пос. Кюсюр. Вальдемар Шнайдер выбрал для этого судно, маршрут на котором протяженностью в несколько дней дал возможность увидеть, измерить и датировать террасы низовьев реки. Появились совершенно неожиданные данные, осо-