

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЫСОКОШИРОТНОЙ АРКТИКИ НА ПРИМЕРЕ РАБОТ НА НИС «ЛЕДОВАЯ БАЗА МЫС БАРАНОВА» С 2015 ПО 2020 ГОД

Научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова» (НИС) ФГБУ «АНИИ» расположен на архипелаге Северная Земля, в северо-западной оконечности о. Большевик, на берегу пролива Шокальского, в месте с координатами 79°16'45" с. ш. и 101°37'22" в. д.

Главными направлениями работ, выполняемых на НИС с момента его открытия осенью 2013 года Высокоширотной арктической экспедицией (ВАЭ), являются проведение круглогодичных метеорологических и геофизических наблюдений, а также сезонных ледовых, океанологических, гидрологических, геоморфологических, гляциологических и медико-биологических наблюдений.

Развитие геодезической сети сгущения на НИС и на прилегающей территории происходило таким образом, чтобы обеспечить научные исследования координатами и высотами изучаемых объектов суши, льда и т. д. в единой системе координат и высот. Основой для развиваемой геодезической сети сгущения является государственная геодезическая сеть (ГГС), необходимая информация о которой была получена в Росреестре, в частности отметки исходных пунктов в Балтийской системе высот 1977 года (БСВ-77).

В силу большой удаленности друг от друга районов исследований, сильно пересеченной местности, неблагоприятных климатических условий, ограниченности времени и сил, развитие геодезической сети сгущения преимущественно выполнялось методами спутниковой геодезии. Для чего использовалось двухсистемное, получающее необходимую информацию от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС, двухчастотное оборудование, благодаря которому устраняются ошибки задержки прохождения радиосигналов через атмосферу от навигационных спутников к наземным приемникам. В результате повышается точность определения координат и высот на расстояниях до 50 км между исходным и определяемым пунктами геодезической сети.

Для закрепления на местности пунктов геодезической сети сгущения использовалось два вида пунктов: грунтовые и скальные. Так как район научных исследований относится к северной зоне многолетней мерзлоты, согласно «Правилам закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей», ГКИНП-07-016-91 (М.: Картгеоцентр — Геоиздат, 1993), были выбраны рекомендуемые для таких природных условий типы конструкции знаков: тип 150 — грунтовый и тип 9 — скальный. Наиболее надежными в плане сохранности и стабильности положения являются пункты, заложенные в выходах коренных скальных пород. Преобладающий на Северной Земле скалистый ландшафт обусловил закладку 80 % (17 шт.) реперов скального типа из числа всех заложенных. 15 % (три шт.) геодезических пунктов были выполнены в виде грунтовых, из-за необходимости установки репера на метеорологической площадке, согласно требованиям «На-

ставления гидрометеорологическим станциям и постам» (Метеорологические наблюдения на станциях. Вып. 3. Ч. 1. Л.: Гидрометиздат, 1985), и для удобного выполнения измерений на территории НИС и у гидрологического пункта наблюдений (ГПН). И только один грунтовый геодезический пункт (т. е. 5 % случаев) был заложен у взлетно-посадочной полосы в 4 км от НИС из-за отсутствия поблизости выходов коренных скальных пород.

Конструкция грунтовых геодезических пунктов «тип 150» для районов северной зоны многолетней мерзлоты представляет собой центр, изготовленный из металлической трубы диаметром 5 см, с приваренной к верхнему концу маркой и якорем на нижнем конце, в виде диска и нескольких полудисков диаметром 15 см, отстоящих на некоторое расстояние друг от друга. Так как протаивание грунта в северной части о. Большевик не превышает глубины 125 см, то, согласно требованиям «Правил закладки центров...», нижний конец трубы заглублялся на глубину не менее 2 м от границы протаивания, составляющей 40–50 см. Изготовление центров грунтовых реперов выполнялось силами персонала НИС, с использованием возможностей имеющейся на станции материально-технической базы. Бурение скважин для установки центров геодезических пунктов осуществлялось буровой установкой «Вектор-ВР», изготовленной в России.

Конструкция скальных геодезических пунктов «тип 9» представляет собой анкерные болты, выполняющие роль центров, помещенные в предварительно просверленные перфоратором в скальной породе отверстия, заполненные битумной мастикой для предотвращения попадания влаги и разрушения пункта в результате колебаний температуры воздуха.

На основе внешнего осмотра состояния пунктов ГГС и собранных спутниковых измерений выяснилось, что 10 задействованных исходных пунктов грунтового типа удовлетворяют требованиям точности исходной сети и могут быть использованы для привязки пунктов развиваемой сети сгущения. Что, в свою очередь, подтверждает надежность технологии закладки грунтовых реперов сети ГГС и их неподверженность сезонному оттаиванию почвы. Определенную сложность в посещении некоторых пунктов ГГС вызвало их расположение в горной местности с высотами, достигающими 500 м, в удаленных от районов научных исследований местах. Так как геодезические работы выполнялись в весенне-осенний период, при отсутствии снежного покрова, то в большинстве случаев доставка людей и оборудования к месту работ выполнялась, пока позволял рельеф местности, вездеходным транспортом и далее в пешем порядке.

В 2020 году, через четыре года после закладки двух грунтовых реперов на территории НИС, были выполнены контрольные спутниковые геодезические измерения. За исходные пункты были приняты реперы скального типа,

также заложенные в 2016 году. Наблюдения выполнялись в режиме «статики», заключающемся в установке геодезических спутниковых приемников над исходным и определяемым пунктами на штативах и приведении их к горизонту и центру, относительно марки репера, с применением подставок (так называемых трегеров), оснащенных цилиндрическими уровнями, обеспечивающими установку оборудования с точностью центрирования 0,5 мм на каждые полтора метра высоты установки прибора. После установки приемников выполнялась запись в память спутниковых данных в течение 40 мин и более, в зависимости от окружающих условий (открытость горизонта, геометрия созвездия спутников ГНСС и т. д.), и их последующая обработка на персональном компьютере с применением специального программного обеспечения, поставляемого вместе с оборудованием. Метод «статики» позволяет определять плановые координаты места с точностью 3 мм + 0,5 мм на каждый 1 км расстояния между исходным и определяемым пунктами и 4 мм + 1 мм на 1 км расстояния по высоте.

Сравнение полученных координат и высот грунтовых геодезических пунктов в 2016 и 2020 году показало неизменность их положения в плановом и высотном отношении с учетом вышеуказанной погрешности определения координат с помощью применяемого спутникового геодезического оборудования. Внешний осмотр скальных пунктов «тип 9» геодезической сети сгущения, заложенных в 2016 году и в последующие годы, показал надежность их установки, неподвижность центров, сохранность гидроизоляции и подтвердил верность выбранной технологии закладки.

Определенная сложность в развитии геодезической сети сгущения была связана с расположением некоторых районов исследований на берегу острова Большевик, что сказывается в ограниченном количестве пунктов ГГС, их расположении относительно определяемых пунктов. Например, такая ситуация сложилась на территории НИС, расположенной за границей полигона, образуемого доступными пунктами ГГС, необходимого для корректного вычисления координат и высот определяемых пунктов. В таком случае для определения высот пунктов использовался более трудозатратный метод геометрического нивелирования с применением оптического нивелира. Параллельно с развитием высотной сети сгущения на территории НИС этим методом было выполнено контрольное нивелирование заложенного репера на гидрологическом пункте наблюдений на р. Мушкетова. Оно подтвердило ранее полученную отметку того же репера методом спутниковой геодезии, а следовательно, надежность данных измерений.

Определенный интерес для научных исследований представляет расположенная на полуострове Олений в 24 км северо-восточнее НИС ныне закрытая полярная станция «Мыс Песчаный». Эта станция (разряд МГ-2), принадлежавшая Диксонскому УГМС и впоследствии переданная в Северное УГМС, выполняла морские и метеорологические наблюдения в период с 1961 по 1994 год и была переименована в «Песчаный». Обследование территории станции выявило сохранность пяти реперов грунтового типа, три из которых указаны в технических делах станции 1960–1970-х годов и уже тогда использовались в работе.

Контрольное нивелирование реперов станции «Песчаный» в 2015, 2017, 2020 годах, где за исходный пункт был принят репер ГГС, имеющий отметку в БСВ, показало колебания отметок высот всех трех исследу-

емых реперов от 2 до 10 см, что связано с заложением центров пунктов на глубину менее 1,5 м, при необходимых 2,5 м. Оказывал влияние и такой фактор, как сезонное оттаивание грунта. О несовершенстве высотной геодезической основы на станции упоминается в отчете полярной станции 1973 года с требованием устранить этот недостаток. В распоряжении автора нет технических дел за более поздние годы, но можно предположить, что эта задача была решена, так как на границе станции, согласно данным Росреестра, установлен пункт триангуляции ГГС 2-го класса точности, имеющий отметку в БСВ, определенную геометрическим нивелированием.

В ходе очередного обследования реперов станции «Песчаный» в 2020 году было установлено, что репер № 2, признанный по материалам технического дела станции 1973 года одним из самых надежных из имеющихся и рекомендованный для использования в работе, был уничтожен в результате стремительного отступления береговой линии, произошедшего из-за имевших место в 2020 году сильных штормов и высоких температур окружающего воздуха. Так, 5 августа был зарегистрирован максимум температуры воздуха (+17,8 °С) за все время проведения наблюдений на НИС с 2013 года. Надо добавить, что, по данным, имеющимся в технических делах станции, и данным наших съемок, отступление береговой черты в сторону станции «Песчаный» с 1966 по 2020 год составило порядка 30–40 м. То есть «море наступает».

Геодезические наблюдения в рамках гляциологической программы исследований за смещением 29 ледомерно-скоростных вех на леднике Мушкетова, расположенном в 18 км южнее НИС, и 9 вех на леднике Семенова-Тян-Шанского, в 38 км южнее НИС, были начаты соответственно в 2015 году и 2016 году и регулярно выполняются по настоящее время. За исходные пункты были приняты репер ГГС грунтового типа, расположенный у ледника Мушкетова, и пункт сети сгущения скального типа, находящийся у ледника Семенова-Тян-Шанского. Для выполнения измерений применялось спутниковое геодезическое оборудование. Максимальное удаление вех от исходного пункта составляет 10 км на леднике Мушкетова и 15 км на леднике Семенова-Тян-Шанского. Ледомерно-скоростные вехи на ледниках представляют собой металлические трубы диаметром шесть сантиметров и длиной не менее четырех метров, забуренные в лед на половину своей длины. Спутниковый геодезический приемник устанавливался на верхний срез вехи с помощью подставки, обеспечивающей точную установку прибора относительно вертикальной оси вехи.

Геодезические наблюдения на ледниках выполнялись преимущественно в весенний период, когда доступ к вершинам вех был облегчен высоким снежным покровом. Из неблагоприятных факторов, влияющих на выполнение данных изысканий, нужно отметить сильный ветер со скоростью, превышающей 10–15 м/с, регулярно встречающийся на ледниках и приводящий к вибрации и раскачиванию вех, особенно в летне-осенний период, когда снежный покров истончается и более не удерживает вехи по всей длине. В таких условиях выполнение геодезических работ нецелесообразно из-за вышеперечисленных факторов, снижающих точность измерений.

Спутниковые измерения в режиме «статика» требуют значительных затрат времени, не менее 40 мин на каждой вехе, к которым необходимо добавить время на переезды между вехами на снегоходах. Вследствие это-

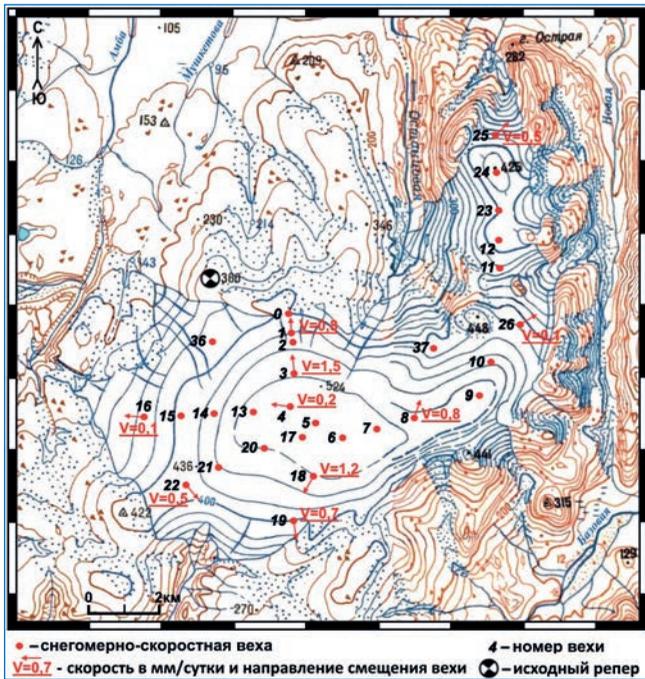


Рис. 1. Вычисленные скорости смещения, направление и изменение высоты ледомерно-скоростных вех на ледниках о. Большевик

го спутниковый приемник, установленный на исходном пункте и все время работ непрерывно записывающий данные в свою память, требует надежного источника питания постоянного тока, в роли которого выступает внешний аккумулятор большой емкости, подключенный через кабель. Это оборудование не входит в стандартную комплектацию и приобретает отдельно.

Результатом выполненных геодезических измерений стали вычисленные скорости смещения, направление и изменение высоты ледомерно-скоростных вех на ледниках с точностью до нескольких мм, некоторые данные приведены на рис. 1 и 2. Более того, известные координаты и скорости вех позволяют найти, с применением спутникового геодезического оборудования, часть вех, утерянных в результате снегонакопления на леднике Семенова-Тян-Шанского, и восстановить ряд наблюдений.

С северной стороны ледника Семенова-Тян-Шанского расположено озеро Спартаковское протяженностью 4 км и шириной 500 м, образовавшееся в результате выхода выводного ледника во фьорд Спартак, создавшего естественную плотину, из-за которой уровень воды в озере поднимается на высоту более 100 м относительно уровня моря во фьорде. В августе 2016 года в озере произошло катастрофическое понижение уровня воды (вероятно, за счет прорыва естественной перемычки), предположитель-

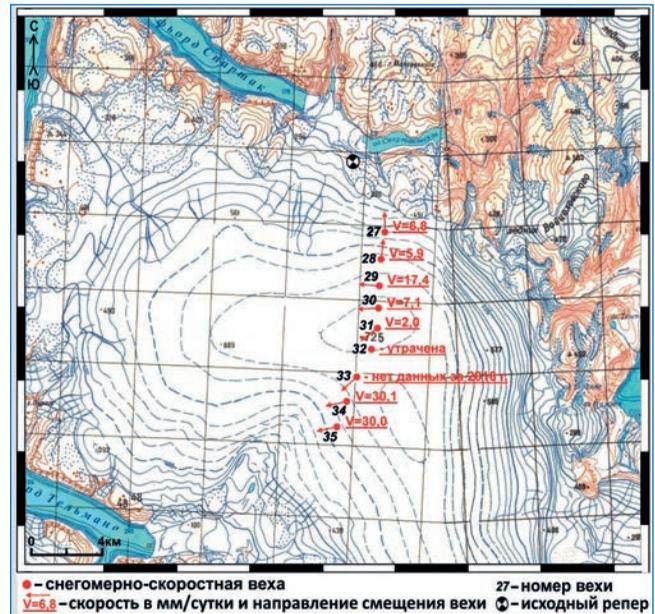
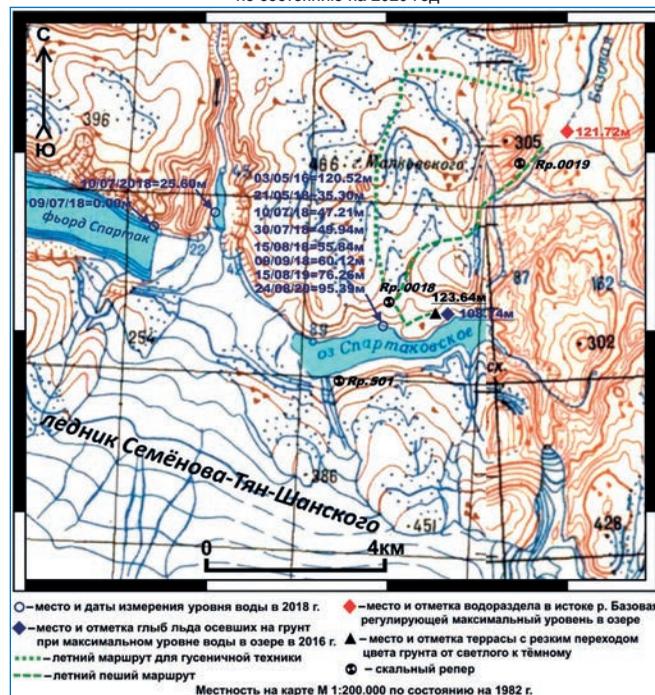


Рис. 2. Результаты геодезических измерений на озере Спартаковское по состоянию на 2020 год

но, по имеющимся данным геодезических измерений, до уровня моря. Только в 2017 году озеро опять стало наполняться, причем отметка его зеркала повышалась в среднем за год на 35 м.

В инициативном порядке геодезический отряд приступил к ежегодным наблюдениям за уровнем воды в озере. Для этого на северном берегу озера был заложен репер скального типа и выполнены спутниковые геодезические измерения по его привязке к уровню моря во фьорде Спартак и непосредственно измерения уровня воды в озере. Использование в наблюдениях Балтийской системы высот было затруднено тем, что ближайшие необходимые для высотной привязки пять пунктов ГГС расположены в сильно пересеченной горной местности и их достижение весьма затруднено. При этом колебания уровня моря в прилегающем проливе

Рис. 3. Основные результаты геодезических измерений на озере Спартаковское по состоянию на 2020 год



Шокальского не превышают 0,5 м и могут считаться минимально достаточными для наблюдения за уровнем воды в приледниковом озере. В будущем планируются нивелирные работы по уточнению привязок отметок уровня воды в оз. Спартаковское к уровню моря во фьорде Спартак и к БСВ.

По имеющимся данным геодезических наблюдений, в 2021 году в озере Спартаковское ожидается увеличение объема воды и поднятие уровня зеркала до критической отметки, при достижении которой произошел катастрофический сброс воды в 2016 году. Надо отметить, что на такой же отметке высоты находится водораздел

р. Базовой, впадающей в залив Ахматова. То есть уровень воды в озере может регулироваться этим водотоком. Подробнее с исследованиями озера Спартаковского можно ознакомиться в статье выпуска № 4 за 2017 год сборника «Российские полярные исследования». Основные результаты геодезических измерений на озере по состоянию на 2020 год представлены на рис. 3.

Исходя из опыта работ со спутниковым геодезическим оборудованием в горной местности у озера Спартаковское, необходимо отметить наблюдавшееся сильное многократное отражение радиосигналов спутников ГНСС, принимаемых наземными приемниками, от окружающих склонов гор. Несомненно, эти помехи сказываются на качестве получаемых данных и, в свою очередь, на точности определения координат и высоты места. В таком случае необходимо планировать увеличенные по времени спутниковые наблюдения и по возможности выбирать место для установки наземных приемников с наибольшей открытостью небосвода.

Геодезические измерения также были востребованы при выполнении промеров овального по форме озера Твердое с диаметром около 800 м и глубиной до 10 м, расположенного в 5 км юго-восточнее НИС. Работы заключались в высотной привязке автоматического уровнемера к БСВ и промеру глубин. Батиметрическая съемка выполнялась как с лодки, так и со льда. В первом случае на лодку и над репером, расположенным на берегу озера, устанавливалось спутниковое геодезическое оборудование, работающее в режиме «кинематика». Данный метод измерений позволяет записывать трек движения подвижного приемника, размещенного в нашем случае на лодке, и выполнять измерения на точках в течение всего 3 с и более с получаемой точностью 10 мм + 1 мм на 1 км расстояния между приемниками в плане и 15 мм + 1 мм на 1 км по высоте. Для некоторых видов научных работ такой точности вполне достаточно, и она компенсируется оперативностью и массивом собираемых данных о пространственном положении подвижного спутникового приемника, установленного на лодку или другие средства передвижения, переносимого человеком на вехе и т. д.

При выполнении уточняющего промера озера Твердое со льда был востребован режим спутниковых геодезических измерений в режиме реального времени, так называемый RTK (Real Time Kinematic). Суть данного метода заключается в том, что спутниковый приемник, установленный на исходном пункте, по УКВ-радиоканалу или при наличии сотовой сети мобильной связи стандарта GSM передает на подвижный приемник поправки, позволяющие точно определять его координаты и высоту в реальном времени, с выводом необходимой информации на экран наладонного компьютера, входящего в комплект оборудования, с точностью 10 мм + 1 мм на 1 км расстояния между приемниками в плане и 15 мм + 1 мм на 1 км расстояния по высоте. Таким образом, группа исследователей, имея в памяти подвижного приемника координаты точек предыдущих промеров, выходила на места запроектированных промеров по сгущению съемки и быстро и точно выполняла свою работу. Слабым местом метода измерений в режиме RTK в условиях отсутствия сотовой связи GSM в малонаселенных районах является зависимость от передачи данных по радиоканалу, которому требуется прямая видимость между исходным и подвижным приемниками. Также свои ограничения накладывают характеристики радиоаппаратуры в базовой комплектации оборудования, оно

позволяет уверенно принимать поправки на расстоянии между приемниками не более 2 км. Данный недостаток оборудования может быть исправлен расположением своих геодезических пунктов сгущения непосредственно рядом с местом работ или приобретением дополнительной более мощной радиопередающей аппаратуры.

Большие возможности в геодезических измерениях дает внедрение беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа (БПЛА), оснащенных системой навигации на базе ГНСС GPS/ГЛОНАСС и барометрическим высотомером, способных зависать на месте и выполнять фотосъемку подстилающей поверхности с привязкой центров снимков к координатам и высоте места выполнения снимка с последующим построением цифровой модели рельефа (ЦМР) с помощью пакета программного обеспечения «Agisoft Metashape» российской разработки. Подробно о данной методике рассказывается в статье сборника РПИ № 4 за 2018 год. Часть технологии отражена в патенте № 273003 «Способ определения физико-механических и морфометрических характеристик ледовых торосистых образований», полученном ААНИИ в 2020 году. В первую очередь данная технология была востребована на НИС при изучении морфометрии ледяных объектов моря, таких как торосы, айсберги. До этого подобная съемка выполнялась с применением электронного тахеометра, использующего измерения на отражатель, установленный на определяемую точку человеком, или в безотражательном режиме, когда выполняется непосредственно измерение интересующей поверхности ледяного объекта, без нахождения на нем человека.

Применение БПЛА мультироторного типа, совместно со спутниковым геодезическим оборудованием, позволяет получать сопоставимую по точности ЦМР в сравнении с получаемой методом тахеометрической съемки и в разы повышает качество получаемого результата, сокращает время выполнения работ и дает в распоряжение исследователей значительно больший массив данных, чем при использовании съемки с применением электронного тахеометра. Более того, получение ЦМР с применением БПЛА, оснащенного бортовым спутниковым геодезическим оборудованием, имеющегося в распоряжении ААНИИ, возможно выполнять с такой же точностью, как описано выше в настоящей статье, с применением привязанных опорных знаков, но без выхода научного персонала с судна на лед.

Недостатком данной методики является наличие неблагоприятных метеоусловий для полетов БПЛА, таких как сильный ветер со скоростью более 10 м/с, атмосферные осадки, отсутствие видимости. В таких условиях оправданно применение электронного тахеометра в геодезических работах по созданию ЦМР.

Возможности сопряжения спутникового геодезического оборудования с различной научной аппаратурой позволяют говорить о востребованной технологии спутниковой геодезии в научных исследованиях. Также не исчерпали еще себя различные режимы работы данного оборудования применительно к изучению морфологии ледяных объектов и элементов суши. Внедрение новинок, таких как БПЛА, не отменяет классического геодезического инструментария, электронного тахеометра, оптического нивелира, который необходим для контроля получаемых новым оборудованием результатов.

*А.С. Парамзин (ААНИИ)*