

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАБОТЫ ОРГАНИЗАЦИЙ РОСГИДРОМЕТА НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН

Архипелаг Шпицберген, в особенности о. Западный Шпицберген, где расположен пос. Баренцбург, является наиболее репрезентативной территорией для проведения комплексных гидрометеорологических исследований. Такие научные исследования на о. Западный Шпицберген проводят специалисты Росгидромета из ААНИИ, СЗФ НПО «Тайфун», Мурманского УГМС. В 2016 году эти организации вступили в консорциум «Российский научный центр на архипелаге Шпицберген», участники которого выполняют работы в соответствии с ежегодной объединенной «Межведомственной программой научных исследований и наблюдений на архипелаге Шпицберген».

Организациями Росгидромета проводится регулярный гидрометеорологический и экологический мониторинг в районе поселков Баренцбург, Пирамида и прилегающих акваторий фьордов, что позволило собрать объективную натурную информацию об основных климатических характеристиках изучаемого района и создать региональную, комплексную систему мониторинга окружающей среды на о. Западный Шпицберген и в районе пос. Баренцбург.

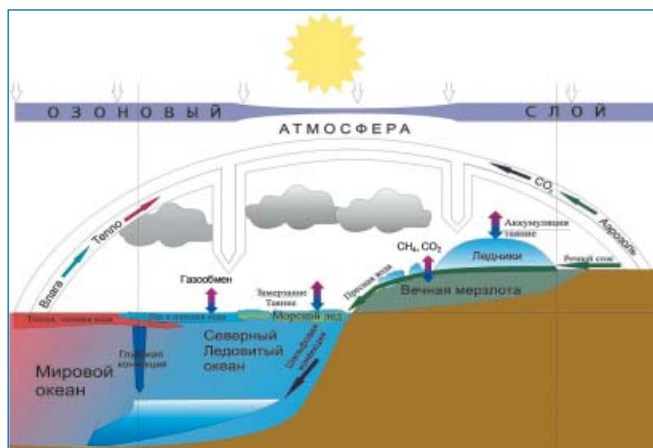
Ежегодно на о. Западный Шпицберген организуется несколько экспедиций организациями Росгидромета как в зимнее время, так и в весенне-летний период, а ГМО «Баренцбург» Мурманского УГМС и зимовочный состав ААНИИ работают на архипелаге круглогодично. В настоящей статье приводятся результаты исследований, выполненных в последние десятилетия.

На формирование и изменения климата в районе архипелага Шпицберген влияет в первую очередь перенос явного и скрытого тепла в Арктику через атлантические «ворота» от 0° до 80° в.д.

Расчеты атмосферных переносов явного и скрытого тепла в Арктику через 70° с.ш. показали, что основной приток атмосферного тепла зимой оказывает наибольшее влияние на изменения зимней температуры воздуха в приатлантической Арктике, в том числе и на архипелаге Шпицберген.

Влияние региональной атмосферной циркуляции на изменения площади льда и температуры воздуха в Баренцевом море оказалось незначительным по сравнению с вкладом притока атлантических вод (АВ). Более всех заметно влияние

Процессы, участвующие в формировании климата Арктики



меридиональной составляющей атмосферной циркуляции, оцениваемой разностью давления между Шпицбергенем и Землей Франца-Иосифа (ЗФИ), зимние аномалии которой оказывают влияние на температуру воды и площадь морского льда (ПМЛ) в течение почти всего года.

Анализ сезонных и многолетних изменений ледовитости в районе архипелага Шпицберген обнаруживает, что в водах, омывающих архипелаг, в течение последних 35 лет наблюдается устойчивая тенденция к смягчению ледовых условий, как в среднем за год, так и для отдельных сезонов. Общее сокращение площади ледяного покрова по среднегодовым значениям составляет 2,6 тыс. км² в год.

Характер сезонной изменчивости ледовитости в районе арх. Шпицберген обусловлен особенностями циркуляции вод и морских льдов. Выявлено, что с 1979 по 1998 год наблюдалось уменьшение величин положительных аномалий ледовитости, а с 1999 года по настоящее время наблюдается увеличение величин отрицательных аномалий.

За период 1900–2012 годов приземная температура воздуха (ПТВ) повысилась на 2,6 °С. Период 2005–2012 годов оценивается как наиболее теплый за все время инструментальных наблюдений. Анализ долгопериодной изменчивости ряда основных ледовых характеристик для периода 1973–2008 годов выявил общее смягчение ледовой обстановки на примере залива Грэн-фьорд (о. Западный Шпицберген).

Значительная аномалия температурного поля в районе о. Западный Шпицберген зафиксирована в 1968, 1988, 2012 годах (значение аномалии в 1968 году превышает среднеквадратическое отклонение в 3 раза).

Наиболее интенсивное увеличение ПТВ наблюдается примерно с середины 1980-х годов до нашего времени. Это так называемый «современный» период потепления. Данный период существенного увеличения ПТВ в районе арх. Шпицберген совпадает с периодом хорошо известного «Арктического усиления», под которым понимается значительное увеличение температуры воздуха в 1980–2010 годы в масштабах всей Арктики.

Вечная мерзлота — наиболее инерционная составляющая в климатической системе атмосфера — океан — земная по-

Временная изменчивость площади ледяного покрова для о. Западный Шпицберген за период с 1979 по 2015 год (III – март; IX – сентябрь)

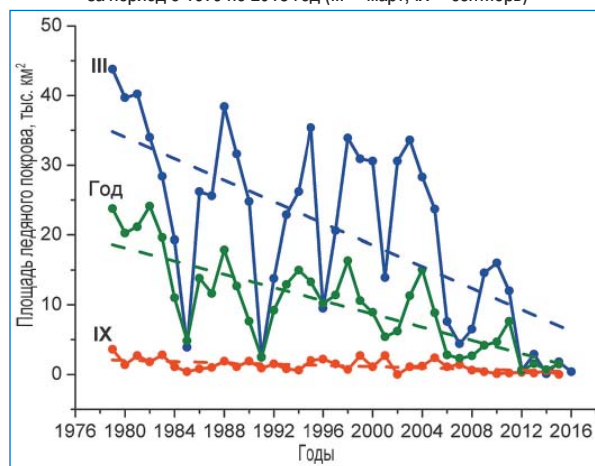


Таблица 1

Средние значения разницы между максимальными и минимальными значениями ПТВ в течение года (весь доступный период наблюдений)

Станция	Размах колебаний, градусы (период наблюдений, годы)
Айс-фьорд радио	18,8 (1935–1940, 1947–2014)
Баренцбург	21,8 (1932–1940, 1947–2014)
Лонгйир	24,4 (1899–2014)
Пирамида	25,0 (1940, 1948–2014)
Хорнсунн	18,7 (1935–1940, 1947–2014)
Нью-Олесунн	21,1 (1935–1940, 1947–2014)

верхность. В то же время проводимые в последние десятилетия наблюдения за реакцией мерзлоты на потепление климата в северной полярной области Земли достаточно однозначно указывают на возрастание среднегодовых температур грунта, интенсификацию термокарста и термоабразии морских берегов, увеличение глубины сезонного оттаивания.

В 1935 году, т.е. всего три года спустя после приобретения у голландцев угольных участков, Шпицбергенская геологическая экспедиция треста «Арктикуголь» начала проведение гидрогеологических исследований, но в 1940-х годах эти исследования были прекращены, и только в 2016 году Российская арктическая экспедиция на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ААНИИ возобновила геокриологические исследования.

В 2016–2018 годах в полевых работах РАЭ-Ш участвовал отряд мерзлотоведов, в задачи которого входили рекогносцировка мерзлотно-геологических условий в районе пос. Баренцбург, обустройство криосферного полигона и начало постоянных наблюдений за откликом вечной мерзлоты на изменения климата, а также отбор кернов мерзлых отложений с целью выявления характера изменений природной среды Шпицбергена за последние десятки тысяч лет.

Криосферный полигон был заложен в двух километрах к северу от Баренцбурга на восточном берегу залива Айс-фьорд. Для мониторинга мощности сезонно-талого слоя (СТС) в пределах криосферного полигона была заложена площадка CALM. CALM — Международная программа циркумполярного мониторинга деятельного слоя (*Circumpolar Active-layer Monitoring*), созданная в 1990 году и являющаяся составяющей систем GTOS (*Global Terrestrial Observing System*) и GCOS (*Global Climate Observing System*), работающих под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Криосферный полигон к настоящему моменту включает: две термометрические скважины глубиной 20 м с постоянно действующими термометрическими косами, две скважины для разовых термометрических замеров, площадку мониторинга сезонно-талого слоя с термометрической скважиной и автоматической метеостанцией, а также пункт мониторинга группы булгуньяхов.

Полученные данные показали, что температура на глубине 15 м составила $-2,37$ °С. Измерения мощности сезонно-талого слоя, проведенные в сентябре по регулярной сетке с шагом в 10 м на площадке размером 100 на 100 м, показали значения глубины зимнего промерзания от 1,15 до 2,60 м при среднем значении 1,56 м.

Начиная с 2000-х годов резко возрос интерес к исследованиям эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу. В значительной степени это вызвано завершением строительства и проведением экспериментов на супермощном КВ нагревном комплексе в Гаконе на Аляске, США (проект HAARP). Существенно интенсифицировались также исследования на нагревном комплексе EISCAT/Heating в Тромсё.

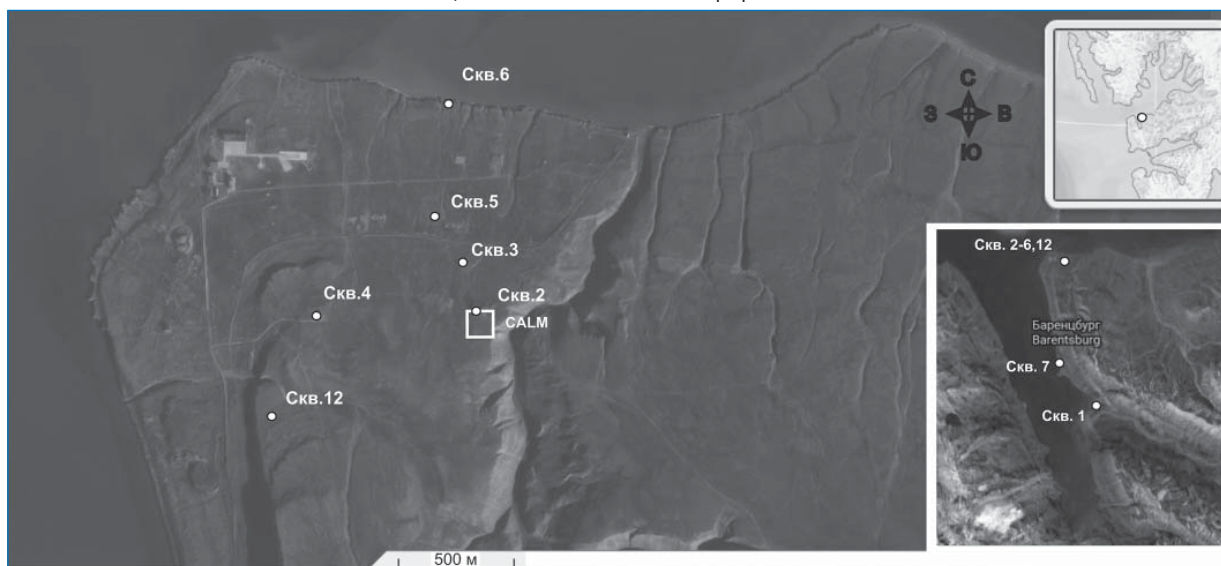
В 2004 году недалеко от г. Лонгйир на арх. Шпицберген был построен нагревной стенд SPEAR (*Space Plasma Exploration by Active Radar*), который существенным образом отличается от всех ранее построенных и работающих КВ нагревных стендов.

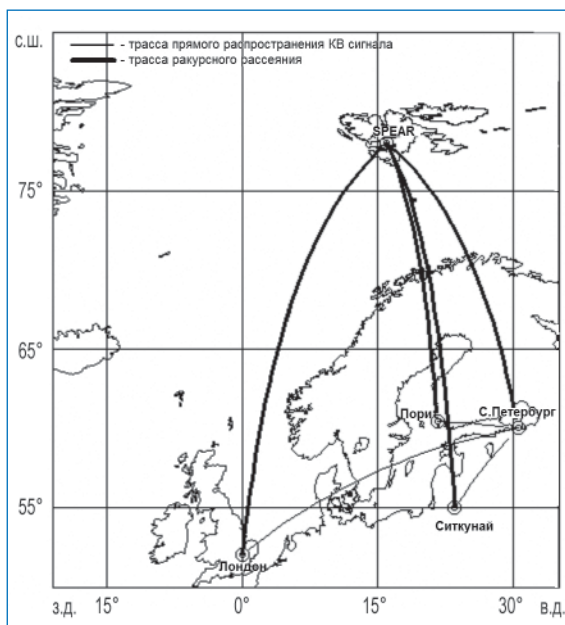
В рамках норвежско-российского сотрудничества по программе полярных исследований (POLRES), проект SPEAR–UNIS–AARI, эксперименты проводились в октябре 2010, 2011 и 2012 годов. Многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, предназначенный для регистрации нагревных КВ-сигналов стенда SPEAR и диагностических КВ-радиосигналов был установлен в обсерватории ААНИИ «Горьковская», расположенной в 70 км от Санкт-Петербурга на расстоянии порядка 2000 км от комплекса SPEAR.

Обобщение результатов экспериментальных исследований ААНИИ по воздействию мощных КВ-радиоволн, излучаемых нагревным комплексом SPEAR (Лонгйир, арх. Шпицберген), на полярную ионосферу свидетельствуют, что SPEAR, не имеющий аналогов в мире по своему географическому расположению, эффективно модифицирует полярную ионосферу, вызывая генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и искусственного радиопрозрачного слоя (ИРС).

Для геофизических условий, соответствующих условиям проведения экспериментов на стенде SPEAR, было выполне-

Спутниковое изображение криосферного полигона в Баренцбурге с указанием мест расположения скважин и площадки наблюдений за мощностью сезонно-талого слоя по программе CALM





Карта-схема геометрии экспериментов на нагретом стенде SPEAR в г. Лонгйир (арх. Шпицберген)

но моделирование траекторий распространения диагностических КВ-сигналов при их рассеянии на МИИН. Результаты моделирования показали, что сигналы, рассеянные на МИИН в F - или E -областях ионосферы в искусственно возмущенной области ионосферы над SPEAR, могут попадать в приемный пункт, расположенный вблизи Санкт-Петербурга.

Впервые обнаружено искусственное радиоизлучение ионосферы в E_s слое, сопровождаемое генерацией МИИН. По результатам анализа экспериментальных данных, полученных в Баренцбурге, обнаружено возникновение широкополосной «шумоподобной» компоненты и появление дополнительных максимумов в спектре нагретого сигнала.

Множество научных и практических проблем, решаемых на Шпицбергене, среди которых исследования климата, оледенения, гидрологии суши и прибрежных районов моря, водных ресурсов, экологии и многих других, требуют знания гидрологических особенностей поверхностных водных объектов суши. С 2001 года ААНИИ возобновил научные исследования на архипелаге Шпицберген в рамках темы «Изучение метеорологического режима и климатических изменений в районе архипелага Шпицберген». Гидролого-гидрохимические наблюдения включают в себя мониторинг изменений элементов водного баланса, а также состояния водных объектов арх. Шпицберген. Целью проводимых исследований является получение на их основе современных оценок основных характеристик гидрологического и гидрохимического режима рек, а также оценок тенденций их изменения за последнее десятилетие.

Анализ материалов экспедиционных гидрологических исследований за 2001–2017 годы двух разнотипных рек бассейна залива Айс-фьорд (Грэн и Альдегонда) показал, что тенденции в изменении высоты снега, его плотности и максимальных водозапасах в снеге водозаборов обеих рек отсутствуют, за период 2005–2016 годов сток увеличивается в среднем на 800 тыс. м³ в год в летние и осенние месяцы, когда питание рек происходит преимущественно за счет таяния ледника.

Оценка тенденций изменения состояния вод во фьордах Западного Шпицбергена за период 1990–2000-х годов выявила увеличение влияния АВ на гидрологический режим фьордов. Показано, что в последние 12 лет в Айс-фьорде были зафиксированы самые высокие значения температуры и солености за историю наблюдений с 1965 года. Температура атлантической воды, поступающей во фьорд в летние месяцы,



Внешний вид солнечного фотометра SP-9, установленного на крыше ГМО «Баренцбург»

выросла с 3,5 °С в 1990-х годах до 4–6,5 °С в 2014–2017 годах. В летние месяцы 2000-х и 2010-х годов в Айс-фьорде были зафиксированы максимальные значения температуры и солености за историю наблюдений с 1965 года.

Для оценки современных уровней аэрозольного загрязнения атмосферы, их многолетней динамики, определения основных источников (удаленных, локальных и морских) и путей переноса загрязняющих примесей в Арктику с 2011 года были начаты регулярные исследования атмосферного аэрозоля в Баренцбурге (78° 03,54' с.ш., 14° 13,16' в.д.). Ежегодные циклы экспедиционных исследований характеристик атмосферного аэрозоля выполняются ААНИИ в кооперации с Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН.

Анализ полученных аэрозольных характеристик в приземном слое атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2015 годах показал, что аэрозоль в районе измерений характеризуется сравнительно невысокими величинами содержания, а в межгодовой изменчивости с 2011 по 2013 год проявлялась тенденция увеличения как массовой, так и счетной концентрации аэрозоля, в 2014 году наблюдалось их уменьшение. Средние концентрации сажи в Баренцбурге занимают промежуточное положение между данными в Тикси (2010 год) и более высокими значениями концентраций в районе Белого моря (2003–2007 годы). Концентрации сажи в приземном слое воздуха в Баренцбурге устойчиво превышают ее содержание на антарктических станциях и на станции Цепелин на Шпицбергене. В годовом ходе прослеживается очищение атмосферы в летние месяцы, что согласуется с измерениями ионного состава аэрозоля на других арктических станциях (Норд, Алерт, Барроу, Цепелин, Нью-Олесунн) с многолетними рядами наблюдений.

Оценка загрязнения природной среды арх. Шпицберген в районе расположения пос. Баренцбург и сопредельных территорий проводится с 2002 года Северо-Западным филиалом ФГБУ НПО «Тайфун». Результаты первого этапа работ (2002–2010) вошли в монографию «Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген (пос. Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 гг.».

Результаты экологического мониторинга показали, что содержание основных групп загрязняющих веществ в районе пос. Баренцбург и его окрестностей является характерным для районов развития угледобывающей промышленности в Арктике. При этом в последние годы (2008–2015) в ряде объектов природной среды (атмосферный воздух, снежный покров, почвы, почвенные воды) в районе расположения Баренцбурга отмечено снижение уровней содержания основных групп загрязняющих веществ, обусловленное проводимыми

ФГУП ГТ «Арктикуголь» природоохранными мероприятиями, включающими реконструкцию ТЭЦ и ликвидацию ряда свалок.

В районе пос. Пирамида специалисты ААНИИ ежегодно проводят наблюдения за динамикой ледника Норденшельда и образованием в этом районе айсбергов, с непрерывной регистрацией упругих колебаний скального грунта и поверхности ледника с помощью методов сейсмометрии.

С 2016 года также проводится регистрация физико-механических параметров ледника с привлечением измерительного комплекса с дистанционной передачей сигналов на базу экспедиции в пос. Пирамида на расстояние до 15 км. С помощью сейсмометра на берегу зафиксированы процессы, связанные с падением блоков льда в акваторию фьорда.

Анализ данных показал, что разломные зоны ледника непрерывно подвергаются внешним и внутренним воздействиям полей гравитационных напряжений и динамических нагрузок в результате земных приливов. Воздействие приливообразующей силы на ледник более эффективно, чем на земную поверхность. Приливные явления в леднике обусловлены не морскими приливами, а являются реакцией массы льда на приливообразующую силу системы «Луна — Земля — Солнце». Инструментальный мониторинг колебательных и волновых процессов в массиве ледника выявил механические процессы взаимодействия льда не только со скальными породами, но и отдельных блоков ледника между собой. На основе этих данных разрабатывается методическое пособие

«Инструментальный круглогодичный мониторинг состояния ледников и зарождения айсбергов от выводных ледников в Арктике».

Палеогеографические исследования ААНИИ сосредоточены на голоценовой истории Западного Шпицбергена, изучении донных отложений озер и морских террас, восстановлении положения уровня моря в этот период и механизмов изменения климата и природной среды архипелага. Климатические условия на архипелаге были наиболее теплыми (теплее современных) с 11 тыс. л.н. до 7 тыс. л.н. В дальнейшем климат района был относительно холодным, за исключением периода 4,0–2,0 тыс. л.н. и, безусловно, заметного потепления в последние десятилетия.

В целом можно отметить, что роль специалистов Росгидромета в комплексном изучении природной среды архипелага Шпицберген ежегодно возрастает, растет и количество новых видов научных исследований, для выполнения которых используется самое современное оборудование. Многие результаты исследований получены непосредственно в Баренцбурге благодаря вводу в эксплуатацию современной химико-аналитической лаборатории. Создание РНЦШ и РАЭ-Ш способствует расширению межведомственного и международного сотрудничества.

*Л.М. Саватюгин, Ю.В. Угрюмов (ААНИИ).
Фото из архива РАЭ-Ш*

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ГЛУБИНЫ СОВРЕМЕННОГО ЛЕДОВОГО ВЫПАХИВАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Изучение деформаций дна, связанных с воздействием на дно торосов, стамух и айсбергов, имеет большое значение для снижения риска аварийной ситуации и повышения надежности эксплуатации подводных сооружений. Наиболее распространенный метод, обеспечивающий целостность и устойчивость морских объектов, размещаемых на дне, — заглупление их в грунтовую толщу. Глубина экзарации дна ледяными образованиями — важнейший параметр, который необходимо обязательно учитывать при строительстве подводных добычных комплексов, трубопроводов и прокладке кабелей. В соответствии с нормативами морские сооружения должны заглупляться ниже экстремальной глубины выпихивания. Наиболее актуален вопрос, касающийся оценки опасности экзарации, для айсбергоопасных акваторий. К таковым в пределах западного сектора Российской Арктики относятся Баренцево и Карское моря. В Баренцевом море источниками айсбергов являются выводные ледники и ледниковые купола, расположенные на архипелагах Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), Шпицберген, Новая Земля (о. Северный).

Решение задач о необходимости заглупления и оценки максимально возможной глубины пропахивания донного грунта плавающим материковым льдом тесно связано с проблемой определения максимальной осадки айсбергов.

Обобщение инструментальных данных (эхолотирование, георадарная съемка), расчетов и визуальных наблюдений, выполненных ААНИИ, показало, что максимальная осадка айсбергов в Баренцевом море может достигать 137 м, высота — 45 м. Наибольшую опасность формирования крупных айсбергов (толщиной до 150–200 м и протяженностью более 1–2 км) представляет арх. ЗФИ. Здесь, в частности, зафиксирован айсберг на мели, осадка которого составила 180 м.

Приведенные выше цифры, характеризующие морфометрию современных айсбергов Баренцева моря и величину их осадки, в целом не противоречат, как будет показано ниже, полученным нами данным.

Одной из первых публикаций с описанием отрицательных линейных форм рельефа дна — борозд ледовой экзарации — в Баренцевом море была небольшая заметка известного норвежского морского геолога А. Солхейма (A. Solheim). В этой работе было обращено внимание на то, что борозды ледового выпихивания (плугмарки) обнаружены на различных глубинах, вплоть до изобат 450 м. В то же время максимальная осадка килей айсбергов в регионе исследований (норвежский сектор Баренцева моря) лишь в редких случаях достигала 100 м. Сопоставляя указанные цифры, А. Солхейм сделал вывод, что большинство плугмарок являются реликтовыми и образовались в течение деградации ледников последней (вейхельской) стадии оледенения плейстоценовой эпохи (следует отметить, что уровень моря тогда был не менее чем на 100 м ниже, чем в настоящее время). Отмечается, что источником наиболее крупных айсбергов, встречающихся на акватории Баренцева моря, являются ледники ЗФИ. По мнению А. Солхейма, ледники архипелага могли продуцировать айсберги с осадкой до 120–130 м. Современное выпихивание, по мнению автора рассматриваемой работы, может достичь глубины 120–130 м, как можно судить по изобатам, где были обнаружены плугмарки. Таким образом, на сегодня считается, что глубину 120–130 м можно ориентировочно считать максимальной для современного экзарационного воздействия. В этой связи считается, что к реликтовым плугмаркам сле-