

УДК 551.324:504.054

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СЕВЕРЕ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

© 2017 г. А. Ю. Мирошников¹, Н. П. Лаверов¹, Р. А. Чернов^{1,2}, А. В. Кудиков^{1,2},
А. А. Усачева¹, И. Н. Семенов¹, Р. А. Алиев^{1,3}, Э. Э. Асадулин¹, М. В. Гаврило⁴

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

⁴Национальный парк “Русская Арктика”, Архангельск, Россия

e-mail: almir@igem.ru

Поступила в редакцию 06.06.2016 г.

После доработки 27.06.2016 г.

В сентябре 2015 г. в ходе комплексных исследований в рамках 63-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в районе мыса Желания и Северного ледникового купола на Северном острове архипелага Новая Земля проведено изучение радиационного состояния компонентов окружающей среды. По результатам ландшафтно-геохимических и радиационно-гляциологических исследований установлено, что Северный ледниковый купол является вторичным источником радионуклидов, поступивших на поверхность ледника в период ядерных испытаний в атмосфере на Северном испытательном полигоне Новая Земля. В приледниковой зоне у края Северного ледникового купола в ряде проб зафиксированы уровни удельной активности радиоцезия, достигающие 450–640 Бк/кг. Изучение ледяных кернов, полученных в результате неглубокого (до 5.4 м) бурения трех скважин, не выявило значимых активностей. Однако проведенные гляциологические исследования позволили впервые получить данные о ранее не изучавшемся леднике, опираясь на которые была установлена глубина залегания радиационно-загрязненного слоя, составляющая 15–20 м на границе питания. Подобные исследования в этом районе до сих пор не проводились ни российскими, ни международными научными коллективами.

DOI: 10.7868/S0030157417010099

ВВЕДЕНИЕ

Изучением радиационной обстановки в Арктике занимались многие исследователи в рамках широкомасштабных международных программ и национальных проектов. Отмечая огромную “радиоактивную нагрузку”, наложенную на Западный сектор российской Арктики в предыдущие годы, радиационную обстановку в этом регионе в настоящее время в целом можно считать удовлетворительной. Однако области, в которых произошло накопление и временная консервация радиоактивного загрязнения, требуют отдельного внимания. Таковыми являются зоны повышенной активности (ЗПА) радиоцезия, выявленные ранее в верхнем слое донных осадков у юго-восточных [10] и северо-западных [6] берегов Северного острова архипелага Новая Земля (рис. 1).

Повышенные уровни активности ¹³⁷Cs в отдельных точках донных отложений Карского и Баренцева морей в непосредственной близости от берегов островов Новой Земли отмечались многими исследователями начиная с 90-х годов XX века [14]. При этом источником радионукли-

дов как правило назывались сбросы твердых и жидких радиоактивных отходов (ТРО и ЖРО) в морскую среду, особенно в заливы островов Новой Земли. Более детальные исследования районов захоронения РАО, проведенные позднее такими организациями, как ИО РАН, ГЕОХИ РАН, НПО “Тайфун”, МЧС [13], не выявили какого-либо влияния этих затопленных контейнеров и других объектов на прилегающие участки донных отложений. Сами по себе ЗПА радиоцезия, установленные в Карском и Баренцевом морях, не представляют какой-то значимой экологической угрозы, т.к. уровни активности в них весьма не высокие, а период полураспада ¹³⁷Cs составляет 30.17 лет. Но отсутствие достоверной информации об источнике их происхождения не позволяет оставить этот вопрос без внимания.

В целях совершенствования ядерного оружия в период с 24 сентября 1957 по 15 декабря 1962 г. на Северном испытательном полигоне Новая Земля (СИПНЗ) было проведено 85 взрывов в атмосфере. При этом выделяется серия из 9-ти испытаний, при проведении которых траектории



Рис. 1. Положение зон повышенной активности ^{137}Cs в верхнем слое донных отложений (штриховка – по Иванову, [6], крап – по Мирошникову, [10]) и траектории движений продуктов ядерных испытаний на СИПНЗ 1962 г. (по Михайлову, 2006).

движения облаков, содержащих продукты радиоактивного распада, проходили над поверхностью ледников Северного острова (рис. 1) либо под небольшими углами к его осевой линии [11]. Суммарная мощность этих испытаний составила 16.72–25.22 Мт, что привело к образованию от 2.6 до 4.0 млн. Ки ^{137}Cs . Траектория движения радиоактивного облака наиболее мощного, превышающего 10 мегатонн, взрыва, осуществленного 19 сентября 1962 г., и образовавшего 1.6 млн. Ки радиоцезия, проходила строго вдоль ледораздельной линии Северного острова, а выпадения ^{137}Cs составили около 200 кКи [7, 20].

Таким образом, справедливо предположить, что покровный ледник Северного острова, занимающий площадь около 20 тыс. км² при мощности льда до 300 метров и более, и Северный ледниковый купол (СЛК) в том числе, является огромным депозитарием радиоактивных продук-

тов ядерных испытаний в атмосфере, требующим особого внимания и изучения его возможного влияния на радиационную обстановку прилегающих территорий и морских акваторий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ледяной покров Северного острова в настоящее время является наименее изученным гляциологическим объектом Арктики, а основная информация, опирающаяся на данные прямых наблюдений, была получена в период исследований на леднике Шокальского в районе Русской Гавани в 1957–1959 годах [15]. Покровное оледенение Северного острова протянулось более чем на 400 км с юго-запада на северо-восток. Крайнее положение в этом направлении занимает СЛК, имеющий округлую форму и возвышенную центральную часть [1]. На востоке и юго-востоке ледник спускается на плоскую каменистую равнину

на высоте около 300 м. На западе и северо-западе находятся выводные ледники Иностранцева, Павлова, Вера, Бунге и Петерсона, продуцирующие айсберги в Баренцево море [2, 3]. Дистанционная радиолокационная съемка этих ледников, проведенная в 2007 г., дала сведения о вертикальной мощности льда выводных ледников и объемах айсбергового стока [3]. Но этих данных совершенно недостаточно для оценки баланса массы ледникового купола и его динамических параметров, для чего необходимы результаты прямых наблюдений и измерений характеристик и условий снегонакопления и абляции. Анализ рельефа центральной части купола по современным космическим снимкам и топографическим картам 50-х годов выявил существенные различия высотных отметок, достигающие 200 м [12], что может объясняться и ошибками при построении карт, и изменениями условий питания ледника. Следует отметить, что полевые работы на СЛК ранее никогда не проводились.

Гляциологические и ландшафтно-геохимические исследования, выполненные в ходе 63-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (начальник экспедиции М.В.Флинт), состоялись в сентябре 2015 г., когда полевая группа отряда «Радиогеохимии и гляциологии» в составе четырех человек была высажена на мысе Желания. Группа базировалась на опорном пункте НП «Русская Арктика», а полевой лагерь был установлен на расстоянии 25 км у северо-восточного края ледника.

Во время проведения работ на СЛК его склон был покрыт не стаявшим за лето снежным покровом, за исключением краевой части, где образуются обширные пространства снежных болот. Начиная от края ледника, находящегося на высотной отметке 300 м, по профилю длиной 5800 м в юго-западном направлении на вершину купола до высоты 580 м была проведена снегомерная съемка, в ходе которой через каждые 200 м проводились измерения мощности снежного покрова с применением щупа, упирающегося в лед. В верхней части профиля на плато купола было заложено два шурфа (ТН-21 и ТН-20) на расстоянии 511 м друг от друга (рис. 2), в которых сделано стратиграфическое описание снежной толщи. Таким образом, координаты точек заложения трех шурфов и бурения трех скважин были определены по результатам разведки склона и плато ледника при проведении снегомерной съемки, в ходе которой было установлено положение границ ледника, зоны питания, а также фирновой линии (рис. 2).

Бурение скважин осуществлялось колонковым буром Kovacs Coring System Mark-II (США) в комплекте с метровыми штангами с применением бензинового двигателя Champion (КНР) мощностью 2 л.с., что позволяет получать ледяной керн диаметром 90 мм. Измерения температуры льда в скважинах проводились с применением

термокосы длиной 20 м (Kriolab, Россия), оборудованной терморезисторами, с точностью измерений 0.01°C . Термокоса опускалась в скважину после окончания бурения и выдерживалась более 1 часа, значения температуры снимались после установления стационарного температурного режима. Вертикальная мощность сезонного снега измерялась снегомерной рейкой с точностью 10 мм, определение плотности снега проводилось с применением весов и цилиндрического пробника с точностью 0.01 г/см^3 . Из полученного керна для изотопных исследований (δD , $\delta^{18}\text{O}$), которые будут проводиться позднее, отбирались в пробирки образцы снега и льда с шагом в 10 см, а керн секционировался на части длиной 20 см и упаковывался в герметичную пластиковую тару.

Скважина № 1 была пробурена рядом с шурфом, заложенным в ТН-19 (рис. 2) на высотной отметке 535 м в области максимального снегонакопления на расстоянии 1600 м от первого шурфа (ТН-21). Глубина бурения составила 2.35 м, большую часть которой (1.65 м) составлял снег. Жидкие атмосферные осадки и весьма интенсивное таяние на леднике в период бурения привело к накоплению большого количества воды, как в снежном покрове в области питания, так и в коре таяния в области абляции. Описание керна, полученного из этой скважины, показало, что в этой точке находится сезонный метелевый снег, фирнизированный снежный покров и наложенный лед.

Бурение скважины № 2 осуществлялось ниже по профилю (рис.2), направленному на северо-восток в сторону мыса Желания, на расстоянии 2555 м от скважины № 1 на высотной отметке 437 м в области ледяного питания. Глубина бурения составила 5.35 м, со всей длины которых был получен ледяной керн. Анализ структуры поднятого керна в совокупности с результатами термометрии скважины и измерений плотности льда привел к заключению, что полученный материал отражает последние 15–20 лет. Следовательно, продолжать бурение было целесообразно ниже по склону в области абляции.

На расстоянии 708 м к северо-востоку от скважины № 2 (3263 м от скважины № 1) на высотной отметке 386 м в области абляции на расстоянии 350 м от снеговой линии и менее чем в 200 м от границы питания была заложена скважина № 3 (рис. 2), которая могла достичь слоя льда, образованного зимой 1962–1963 гг., предположительно на глубине около 15 м. В результате начатого бурения был получен керн с интервала 0–1.92 м. На глубине около 2 м произошло заклинивание бура.

Таким образом, было пробурено 3 скважины: в зоне аккумуляции (выше фирновой линии), в зоне ледяного питания (на границе фирновой линии) и в зоне абляции (рис. 2). Всего было отобрано 49 проб ледяного и снежного керна по 20 см. Полученные пробы помещались в герметичные

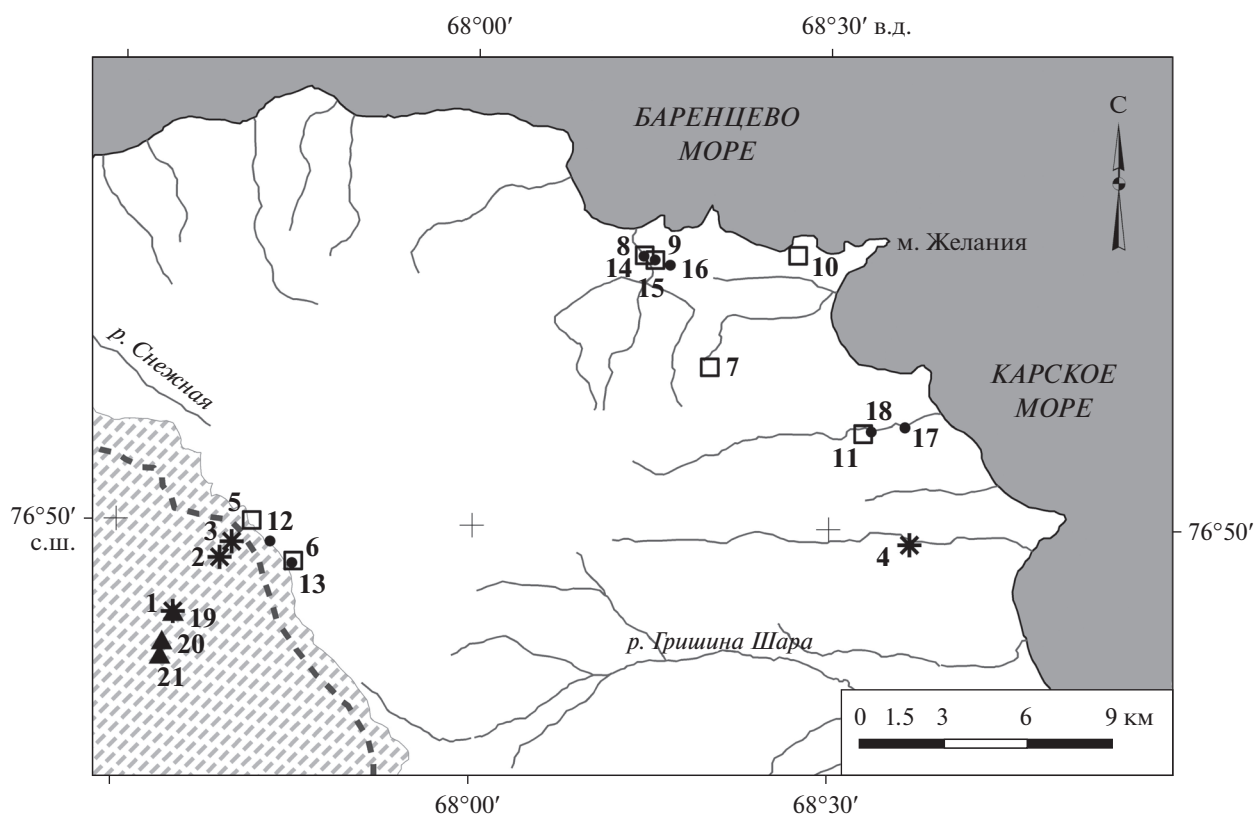


Рис. 2. Схема расположения точек наблюдений (ТН) и отбора: 1–4 проб снега, фирна и льда; 5–11 почвенных проб; 12–18 наилок; 19–21 заложения шурфов. Заштрихованная область – ледник, пунктир – граница питания ледника.

толстостенные пластиковые пакеты и после таяния переливались в герметичные пластиковые флаконы, сертифицированные в соответствии с требованиями МАГАТЭ.

Удельная активность антропогенного ^{137}Cs и природного ^{210}Pb в полученных пробах снега и льда была измерена методом гамма-спектрометрического анализа в лаборатории радиохимии НИИЯФ МГУ. Все пробы ледяного керна упаривали до минимального объема, переносили в пластиковый контейнер для измерений и доводили до сухого остатка в сушильном шкафу. Для области низких энергий (^{210}Pb 46.5 кэВ и ^{241}Am 59 кэВ) использовали планарный детектор из сверхчистого германия GLP-36360/13P4 диаметром 36 мм, толщиной 13 мм. Для определения ^{137}Cs (по линии 661.6 кэВ) и ^{226}Ra (по линии ^{214}Bi 609 кэВ) использовали коаксиальный детектор из сверхчистого германия GEM30P4-76 с относительной эффективностью 30%. Все использованное оборудование изготовлено фирмой Ortec, США. Калибровку по эффективности в области низких энергий (^{210}Pb) проводили по стандартному материалу IAEA-448 Radium-226. Калибровку для ^{137}Cs проводили по интеркалибровочному образцу МАРЕР 97 S4, USDOE. Длительность измерений каждой пробы составляла от 2 до 5 суток. Мини-

мально детектируемая активность для ^{137}Cs составляла 4 мБк/л для пробы объемом 5 литров.

Территория, свободная от ледяного покрова, представлена ландшафтами тундровых пустошей. Ландшафтно-геохимические исследования с отбором проб охватывали два участка. Первый – приледниковый участок, расположенный в непосредственной близости от края ледника, освобожденный от него, предположительно в течение последних десятилетий. Здесь были отобраны почвенные и растительные пробы на точках 5, 6, 12 и 13. На втором участке, расположенном в прибрежной зоне в районе мыса Желания, полевые исследования проведены на поверхности, свободной ото льда уже несколько тысяч лет. Отбор проб проводился на точках 4, 7–11, 14–16 (рис. 2). Всего на указанных точках наблюдения было получено 42 пробы, из которых 23 почвенных, 11 растительных и 8 проб наилок.

Удельная активность ^{137}Cs в этих пробах была измерена методом прямой гамма-спектрометрии на низкофоновом гамма-спектрометрическом комплексе с полупроводниковым Ge(Li) детектором GEM-4519 (GLP-25300/13) и 8000-канальным амплитудным анализатором 919 EG&G ORTEC в ИГЕМ РАН (А.Л. Керзин и Р.В. Соломенников). Гранулометрический состав определялся с применением лазерного гранулометра

“Analizeter-22” в образцах, обработанных 4% $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, на Географическом факультете МГУ. Количественный анализ химического состава растительных и почвенных проб проводился А.И. Якушевым методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в ИГЕМ РАН с использованием спектрометра последовательного действия PW 2400 (Philips Analytical).

Полевые измерения радиоактивного фона на поверхности снега, льда, растительности, почв и наилок проводились с применением радиометра RadEye version 1.35.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам снегомерной съемки было установлено, что на склоне купола распределение снежного покрова имело неравномерный характер. Максимум снегонакопления был зафиксирован на высоте 550 м на бровке плато, при этом самая большая мощность снежного покрова достигала 2.03 м. Увеличение мощности снежного покрова по профилю происходило на 0.6 м на каждые 100 м высоты. На плато распределение мощности снежного покрова было более равномерным и находилось в интервале 1.1–1.2 м. В ходе снегомерной съемки и изучения полученных кернов были определены важнейшие параметры состояния ледника. Северо-восточный склон купола имел равномерный уклон 5 градусов от края ледника до подножия плато. На прилегающей к краю ледника каменистой равнине были обнаружены признаки отступления ледника со скоростью около 2.5 м/год. Зона абляции в нижней части ледового склона составляет около 950 м и поднимается от края ледника на уровне 300 м до высотных отметок в 380–400 м.

В период проведения работ происходило активное таяние на поверхности ледника, температура воздуха в дневные часы была положительной, осадки выпадали преимущественно в виде дождя на уровне края ледника и в виде мокрого снега выше по склону. Не растаявшие пятна снега и наложенного льда маркировали нижнюю границу зоны аккумуляции. В среднем граница питания пролегла на высоте 390 м, а фирновая линия на высоте 405 м. Их положение было максимальным в году проведения наблюдений, так как сезон таяния заканчивался. Фактически с 12 сентября в 2015 г. начиналось накопление снега на леднике, которое являлось наступлением нового сезона аккумуляции. Среднегодовое положение границы питания, полученное по космическим снимкам в период с 2000 по 2009 гг., оценивалось на уровне высоты 435 м [12], что на 45 метров выше установленного. Так как летнее таяние на Новой Земле в 2015 г. было чрезвычайно интенсивным, то низкая граница питания очевидно связана со значительным количеством

твердых осадков в текущем году, что подтвердили наблюдения по снегонакоплению.

Средняя плотность снега, измеренная в двух шурфах на плато купола (ТН-21 и ТН-22), заложенных в фирново-ледяной зоне льдообразования (рис. 2), составляла 0.44 г/см^3 , что согласуется с сезонными наблюдениями на леднике Шокальского [5]. Величина водозапаса, заключенного в снежном остатке и наложенном льду, составила 65 г/см^2 . Погрешность измерений водозапаса находится в пределах 8 г/см^2 , которую можно отнести к ошибке определения толщины наложенного льда и количества талой воды проникшей в нижние слои фирна. Таким образом, в текущих условиях годовой прирост льда на плато был не менее $75 \pm 10 \text{ см}$. Полученная величина водозапаса оказалась близкой к оценкам снегонакопления в центральной части Новоземельского ледникового покрова на станции “Ледораздельная”. Ранее на основе наблюдений в 1957–1959 гг. была получена средняя величина снегонакопления 40 г/см^2 , а расчетные оценки за период 1933–1962 гг. дали величину 42 г/см^2 [15]. Примечательно, что расчет снегонакопления на СЛК давал величину около 24 г/см^2 , что значительно меньше полученных нами значений.

Результаты измерения плотности льда, сделанные по ледяным кернам скважин представлены на рис. 3, а их средние значения приведены в табл. 1. Температурная кривая представлена только для скважины № 2, т.к. значения измеренных температур в скважинах 1 и 3 были нулевыми за исключением нижней точки в скважине № 3, где она составляла -1°C .

Скважина № 1, пробуренная в фирново-ледяной зоне, вскрыла слои наметенного снега, сезонного снежного покрова, части фирнизированного слоя предыдущего года и верхнего горизонта наложенного льда. Плотность снежного покрова увеличивалась с глубиной от 0.22 г/см^3 до 0.45 г/см^3 и возрастала до 0.78 г/см^3 внизу, в горизонте наложенного льда. Средняя величина плотности снега и льда в этой скважине составила 0.48 г/см^3 . Измерения температуры, проведенные в этой скважине на пяти горизонтах, показали 0°C .

Скважина № 2 вскрыла 8 слоев льда и оказалась наиболее информативной. Верхние 1.5 м, имеющие слоистое строение, были представлены матовым инфильтрационным и прозрачным конжеляционным льдом, включая один прослой фирна (рис. 3, 4). Мощность годовых слоев составляет около 0.3 м, иногда достигая 0.4 м. Строение льда в верхнем слое ледника указывает на смену условий питания, что выражено в отмеченном чередовании слоев конжеляционного и инфильтрационного льда. Вероятно, до 2012 г. на высотном уровне этой точки была зона абляции, которая позже сменилась зоной ледяного питания. Как и структура

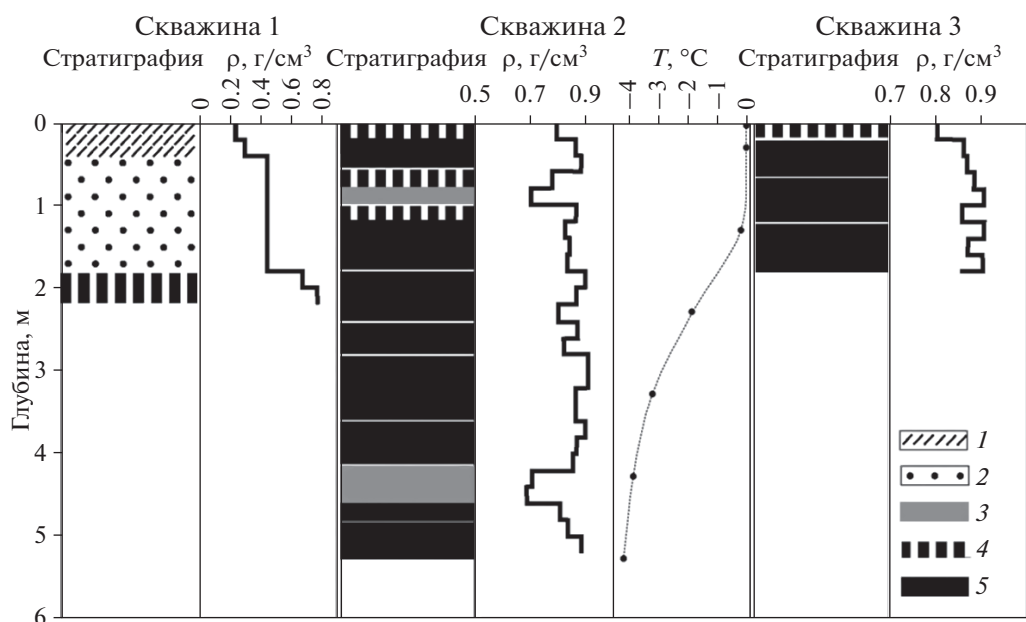


Рис. 3. Стратиграфия, плотность и температура льда в скважинах. Обозначения стратиграфии: 1 – метелевый снег, 2 – фирнизованный снег, 3 – фирн, 4 – наложенный лед, 5 – инфильтрационный лед.

льда, так и вертикальные изменения его плотности в скважине, полученные весовым методом, указывают на сезонные колебания условий льдообразования. Диапазон изменений плотности составляет от 0.7 до 0.9 г/см³ (табл. 1).

Температура верхней толщ льда является индикатором сезонных и годовых вариаций климатических изменений. Термометрия скважины № 2 (рис. 3) выявила признаки потепления в сравнении с аналогичными данными, полученными в период МГГ [15]. Вид температурной кривой показывает, что на глубине затухания сезонных колебаний, составляющей около 8 метров, температура льда опустится до -5°C . Скважина № 2 оказалась значительно теплее, а именно на 2°C , чем измеренные значения в скважине на Барьере Сомнений на леднике Шокальского при равных условиях по глубине и периоду наблюдений.

К сожалению скважина № 3 не принесла ожидаемых результатов. Керн, полученный с интервала 0–1.92 м, был представлен однородным ма-

товым льдом с плотностью 0.85–0.90 г/см³, не имеющим годовой слоистости. Пузырьки воздуха продолговатой формы и различных размеров были равномерно распределены по всему объему керна, что характерно для структуры глубинного инфильтрационного льда. Измерение температуры в стволе скважины на трех горизонтах дало нулевые значения и одно -1°C .

Активность ^{137}Cs во всех измеренных пробах льда, полученного из скважин, не превышала значимый для детектора уровень фонового сигнала (0.0024 импульса в секунду в области 662 кэВ). Активность ^{210}Pb в пробах из скважины № 1 не обнаружена совсем. В пробах из скважин № 2 и 3 также была крайне низкой (11–65 мБк/л), но при этом на 30–80% превышала фоновый сигнал (0.00078 имп./с). Это может означать, что происходило поступление избыточного ^{210}Pb из атмосферы. Выявленного уменьшения активности ^{210}Pb с глубиной керна не выявлено, следовательно разница в возрасте слоев минимальна.

Таблица 1. Координаты и характеристики снега и льда по керну скважин

№ скважины	Географические координаты скважин	Высота, м	Глубина бурения, см	Средняя плотность льда, г/см ³	Зона льдообразования
1	76° 50' 03.95" с.ш. 67° 34' 44.82" в.д.	535	230	0.476	Фирново-ледяная
2	76° 51' 07.63" с.ш. 67° 38' 34.39" в.д.	437	535	0.838	Ледяная
3	76° 51' 26.01" с.ш. 67° 39' 33.99" в.д.	386	190	0.873	Абляции

Полученные уровни активности в целом соответствуют характерным значениям для Баренцево-морского региона, в частности по ледникам Шпицбергена [18].

Вероятно, в связи с потеплением климата условия питания купола в последние годы могли стать более благоприятными, на что указывает понижение фирновой линии, значительное снегонакопление и температура льда в верхнем слое ледника. Это выражено в увеличении твердых осадков и расширении границы питания. Так площадь области аккумуляции в 2015 г. достигла величины 1470 км², что составляет 74% всей площади ледника, ее увеличение оказалось больше на 9% в сравнении с данными начала 2009 г. [12]. Понижение границ льдообразования на леднике привело к покрытию и бронированию тех слоев льда, которые стали вытаивать ниже границы питания в конце XX и в начале XXI века. Вероятно, слой льда 1962–1963 года оказался перекрыт новыми слоями льда и фирна, а его расчетная глубина залегания по данным снегонакопления в области аккумуляции составляет около 30 м от поверхности купола в области питания.

Настоящее состояние СЛК открывает в некоторой степени противоречивую картину: с одной стороны, наблюдаются благоприятные условия для питания ледника, с другой стороны происходит отступление его выводных ледников на стороне Баренцева моря.

На участках, свободных от ледяного покрова, в ландшафтах тундровых пустошей растительность представлена преимущественно мхами *Polytrichum* sp., развитыми в основном в так называемых геогенных зонах [4], образующихся в участках с ветровой тенью между крупными обломками горных пород размером от 5–10 до 15–20 см, иногда более. При этом в пределах равнины приледникового участка присутствуют только мхи рода *Polytrichum*, приуроченные к округлым пятнам диаметром 40–60 см и находящиеся на разных расстояниях друг от друга. По мере приближения к морскому побережью пятнистый характер растительного покрова сменяется полосчато-пятнистым и увеличивается биоразнообразие: между отдельными пятнами образуются перемычки, в составе сообществ появляются зеленые мхи *Aulacomnium* sp., кустистые лишайники, камнеломка *Saxifraga* sp., некоторые злаки. Непосредственно у морского побережья (ТН-10) встречаются зеленые мхи *Aulacomnium* sp., образующие сплошной напочвенный покров и единично произрастает ива арктическая *Salix arctica*.

На изучаемой территории сформировались супесчано-легкосуглинистые петроземы типичные [8], в которых доля физической глины составляет 10–25%, при мощности слоя в 5–15 см серовато-бурого, бесструктурного подстилочноторфяного (O), реже гумусово слабо развитого (W)

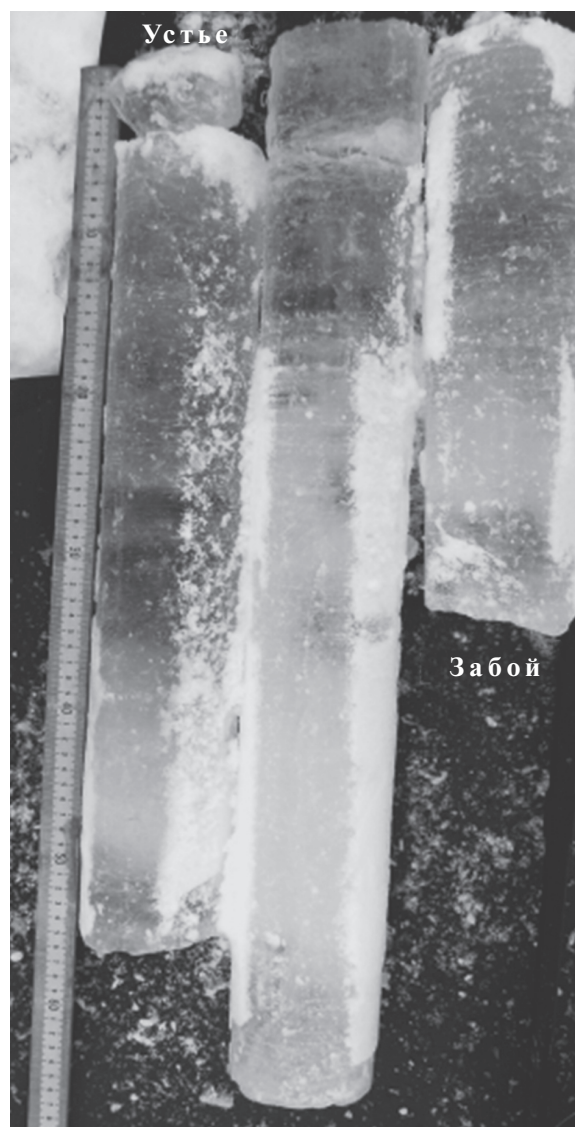


Рис. 4. Верхний слой льда из скважины № 2.

горизонтов, залегающих непосредственно на серой почвообразующей породе (С) — элювии серых глинистых сланцев. Несмотря на сильное обводнение профиля, из-за серого цвета коренных пород, который наследуется почвенным мелкоземом, оглеение не диагностировано, что типично для почв ландшафтов арктических пустошей [4].

Элементный состав петроземов, опробованных на участке в районе мыса Желания (табл. 2), соответствует средним значениям, рассчитанным для почв Шпицбергена [19] и низовьев Енисея [17]. В то же время он отличается пониженным уровнем Fe, Cr, V, Co, Zn, Pb (1.5–2 раза), Ni, Cu, Sr (2–4 раза) и особенно биофильных Mn и Pb (5–7 раз) от петроземов и литоземов побережья залива Степового и Абросимова на о. Южном [9]. Почвы вблизи ледника и на мысе Желания по валовому содержанию элементов практически не отличаются (табл. 2). Минеральные горизонты

Таблица 2. Радиохимические характеристики почв

№ точки и характеристика пробы	5		6		7	8		9		10		11			15	16		
	С [~]	BC	С	AY [~]	BC	С	AY	BC	BC ^w	BC	AY	BC	W	AY	BC	С	BC	С
¹³⁷ Cs, Бк/кг	450	21	—	29	22	—	34	27	10	<3	49	5	56	98	<3	—	<3	<3
¹³⁷ Cs, Бк/м ²	3245	830	—	2050	649	—	48	1004	420	—	37	143	308	39	—	—	—	—
Na ₂ O, %	—	0.65	0.85	0.68	0.77	0.79	0.37	0.5	0.68	0.64	0.68	—	0.64	0.52	0.74	1.01	0.72	0.65
MgO, %	—	3.1	3.1	3	2.8	3.4	2.2	3	3.2	3.3	2.6	—	3	1.8	2.5	1.9	2.4	3.4
Al ₂ O ₃ , %	—	16	13	13	12	14	13	18	17	18	13	—	16	13	18	12	18	18
SiO ₂ , %	—	63	68	69	71	65	40	52	59	59	62	—	56	46	60	69	58	58
K ₂ O, %	—	4.1	2.9	2.8	2.5	2.6	2.7	3.5	3.1	3.5	2.9	—	3.4	2.8	3.6	2.2	4.4	3.5
CaO, %	—	0.2	0.58	0.24	0.28	0.32	1.29	0.54	0.34	0.34	0.82	—	0.58	1.13	0.42	3.33	0.27	0.34
TiO ₂ , %	—	1.02	0.67	0.8	0.83	0.84	0.77	1.04	1.02	1.04	0.79	—	0.82	0.67	0.86	0.7	0.92	1.01
Fe ₂ O ₃ , %	—	6.8	6.4	6.1	5.6	7.6	6.8	8.8	8	8.4	7.1	—	7.8	6.6	8.2	6.3	8.3	8.5
P ₂ O ₅ , %	—	0.11	0.11	0.08	0.09	0.07	0.09	0.1	0.08	0.08	0.12	—	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08
S, %	—	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.05	0.07	0.03	0.02	0.08	—	0.04	0.06	<0.02	<0.02	0.62	0.03
ППП, %	—	4.3	3.2	3.6	3.2	4.9	32.4	11.5	7	5.7	—	—	11.5	27.4	5.7	3.4	6.3	5.9
ФГ, %	—	93	—	93	92	—	88	75	82	72	—	—	74	78	64	—	85	72
MnO, мг/кг	—	450	290	570	520	440	550	730	660	670	2950	—	4740	610	990	2160	720	770
Cr, мг/кг	—	99	74	88	83	101	129	139	123	146	96	—	88	101	94	49	127	121
V, мг/кг	—	148	97	134	128	142	197	199	168	179	157	—	165	132	113	76	154	171
Co, мг/кг	—	19	10	16	15	17	19	16	24	22	21	—	24	22	15	12	23	19
Ni, мг/кг	—	43	32	42	36	47	74	83	67	81	59	—	60	53	56	48	58	75
Cu, мг/кг	—	30	38	27	56	38	41	48	41	48	40	—	47	37	36	23	37	47
Zn, мг/кг	—	82	131	97	84	128	132	112	113	125	129	—	131	122	115	86	99	123
Rb, мг/кг	—	194	127	129	117	120	221	156	144	158	137	—	137	187	178	93	204	166
St, мг/кг	—	40	46	48	51	53	69	89	80	81	85	—	77	123	142	141	118	91
Zr, мг/кг	—	265	307	358	447	246	188	220	267	267	212	—	233	212	171	254	248	264
Ba, мг/кг	—	1176	778	1234	1068	1239	1133	860	697	771	629	—	668	569	539	353	808	801
Pb, мг/кг	—	39	40	23	24	25	42	35	29	34	35	—	27	37	34	26	48	32

Примечание. ППП — потери при прокаливании, ФГ — доля физической глины (диаметр частиц менее 0,01 мм). Почвенные горизонты и признаки: ~ — слоистость, AY — серогумусовый, BC — переходный к почвообразующей породе, C — обломки почвообразующих пород, W — дернина, w — гумусово-слаборазвитый [Классификация..., 2004].

Таблица 3. Удельная активность и запасы ^{137}Cs в растительности

№ точки	5		7	8			9	10	11				14
краткая характеристика	МХИ						злаки	МХИ				водоросли	
	средняя часть	нижняя часть	верхняя часть	верхняя часть	средняя часть	нижняя часть		верхняя часть	верхняя часть	средняя часть	нижняя часть		
Активность, Бк/кг	420 ± 46	610 ± 36	<3	12 ± 6	26 ± 8	93 ± 9	<3	18 ± 8	45 ± 8	83 ± 10	25 ± 10	<3	
Запас, Бк/м ²	244	1952	<7	11	31	242	н/о	13	19	25	6	н/о	

петроземов побережья относительно почв у ледника обогащены Sr (108 ± 21 и 51 ± 7 мг/кг), который, вероятно, поступает с морскими аэрозолями, а также биофильным Mn (682 ± 518 и 403 ± 111 мг/кг). Кроме того, в почвах прибрежного участка по сравнению с более примитивными почвами у ледника содержание Ва ниже (669 ± 231 и 1176 ± 177 мг/кг). Вероятно, барий выносятся из почв в процессе почвообразования.

Результаты радиометрического анализа измерения удельной активности ^{137}Cs в почвенных и растительных пробах, а также в мелкоземных снежниках и в наилках (табл. 2, 3, 4) показали, что она не превышает 100 Бк/кг за исключением одной точки (ТН-5), расположенной в 148 м от края ледника на линии профиля заложения шурфов и бурения скважин. В вертикальном разрезе ТН-5 зафиксированы следующие значения: 420–610–450 Бк/кг (табл. 2). Максимальная активность в 610 (± 33) Бк/кг установлена в нижних частях мха *Polytrichum*, произрастающего у края ледника. При этом активность радиоцезия, измеренная в тех же мхах, отобранных в ТН- 7, 8, 10, 11 (табл. 3) на участке в районе мыса Желания не превышает 93 Бк/кг. Накопление ^{137}Cs в пробах из нижних частей мхов и кустистых лишайников тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири ранее отмечалось в литературе и связывалось с закреплением радионуклидов в тканях растений [16]. Однако с учетом того, что со времени выхода этих публикаций прошла половина периода полураспада радиоцезия, а также учитывая существенно более северное расположение района наших исследований, где плотность глобальных выпадений ниже, полученные значения заслуживают особого внимания.

Таким образом, основная доля радиоцезия ($82 \pm 20\%$) сосредоточена в почвах, а максимальная активность и плотность загрязнения приурочены к верхнему двухсантиметровому слою. Наибольшая активность в почвах выявлена в гумусово-слаборазвитом горизонте. Установленные высокие значения удельной активности радиоцезия в растительности (610 Бк/кг) и почвах

(450 Бк/кг) в ландшафтах тундровых пустошей у края ледника иллюстрируют процесс поступления радиоактивного загрязнения из Северного ледяного купола, являющегося накопителем радионуклидов, образовавшихся во время ядерных испытаний в воздухе на СИПНЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоэкологические исследования, проведенные в сентябре 2015 г. на СЛК и в ландшафтах тундровых пустошей на участке между краем ледника и побережьем Баренцева и Карского морей в районе мыса Желания, позволили получить уникальный материал.

Впервые были получены образцы ледяного керна и проведены полевые исследования на СЛК, в ходе которых на основе прямых наблюдений получены достоверные сведения о структуре гляциологических зон льдообразования на северо-востоке Новоземельского оледенения. Текущее положение снеговой линии и границы питания на северо-восточной стороне купола оказалось значительно ниже предполагаемых оценок. На склоне СЛК определен современный уровень границы питания расположенный на высотах 390–400 м. Этот уровень соответствует периоду похолодания на Новой Земле в 40-х годах прошлого века. Современное состояние границы питания и границ зон льдообразования указывает на улучшение условий питания купола.

Установлено, что в последние годы произошло снижение фирновой линии и границы питания ледника, а северная часть купола до высоты около 580 м имеет признаки зоны инфильтрационно-конгеляционного льдообразования. Преобразование фирна в лед происходит в течение одного-двух лет, что определяет соответственно термический режим ледника. Первые результаты бурения показали, что на куполе идет интенсивное снегонакопление по величине превосходящее теоретические оценки. Анализ данных позволил определить современную аккумуляцию на плато СЛК, которая оказалась равной 65–70 г/см².

Таблица 4. Радиогеохимические характеристики мелкозема в снежниках и наилков

№ точки и характеристика пробы	Наилки								
	мелкозем		с растений					речные	
			<i>Aulacomnium</i>		<i>Aulacomnium</i> и <i>Politrichum</i>	<i>Politrichum</i>			
	4	17	7	10	8	11		13	14
¹³⁷ Cs, Бк/кг	—	<3	<3	64	85	69	71	30	5.5
¹³⁷ Cs, Бк/м ²	—	<17	—	21	170	62	204	—	—
Na ₂ O, %	0.94	0.62	—	—	—	0.56	0.63	0.83	0.85
MgO, %	2.5	2.8	—	—	—	1.9	2.1	2.5	2.9
Al ₂ O ₃ , %	15	18	—	—	—	14	15	12	14
SiO ₂ , %	64	55	—	—	—	49	54	73	66
K ₂ O, %	3	4.2	—	—	—	2.9	3.2	2.3	2.7
CaO, %	0.24	0.27	—	—	—	0.97	0.85	0.3	0.38
TiO ₂ , %	1.05	0.89	—	—	—	0.71	0.76	0.82	0.93
Fe ₂ O ₃ , %	7.2	9.3	—	—	—	6.9	7.4	5.2	7.0
P ₂ O ₅ , %	0.08	0.07	—	—	—	0.06	0.06	0.1	0.08
S, %	0.27	0.11	—	—	—	0.05	0.04	<0.02	0.13
ППП, %	5.2	7.7	—	—	—	22.8	15.8	3.1	4.7
ФГ, %	—	40	72	—	74	77	77	91	84
MnO, мг/кг	760	730	—	—	—	800	750	540	660
Cr, мг/кг	98	127	—	—	—	93	84	71	93
V, мг/кг	156	160	—	—	—	128	135	117	141
Co, мг/кг	25	23	—	—	—	18	22	15	18
Ni, мг/кг	53	72	—	—	—	52	52	31	56
Cu, мг/кг	38	66	—	—	—	37	40	22	32
Zn, мг/кг	100	133	—	—	—	113	120	77	99
Rb, мг/кг	140	226	—	—	—	180	184	106	126
Sr, мг/кг	102	127	—	—	—	140	126	57	83
Zr, мг/кг	554	198	—	—	—	189	214	372	334
Ba, мг/кг	842	558	—	—	—	561	536	918	1008
Pb, мг/кг	40	43	—	—	—	37	33	23	27

Примечание. ППП – потери при прокаливании, ФГ – доля физической глины (диаметр частиц менее 0.01 мм).

Полученные данные позволили рассчитать глубину залегания радиационно-загрязненного слоя в леднике, которая может составлять 25–30 м в холодной фирновой зоне ледника и около 15–20 м на границе питания. Границы распространения поверхности этого слоя предположительно близки к границам современной области аккумуляции, площадь которой равна 1470 км². Уровни удельной активности радиоцезия в 450–640 Бк/кг в ряде проб, отобранных у края СЛК, безусловно свидетельствуют о том, что из него происходит вынос радиоактивного загрязнения, депонированного в период интенсивного проведения ядерных испытаний в атмосфере на СИПНЗ. При этом поступление радиоцезия из СЛК в морскую среду Карского моря в настоящее время, вероят-

но, не происходит, т.к. ландшафты тундровых пустошей, на которых находится край купола, препятствуют его миграции в сторону моря.

Авторы благодарят начальника 63-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” М.В.Флинта, участников полевых исследований Л.С. Радуну и В.А. Сарану, а также заместителя директора НП “Русская Арктика” А.Г. Кирилова, членов отряда Г.И. Надьярных и О.В. Доржиеву, капитана судна Ю.Н. Горбача и весь экипаж, а также всех участников экспедиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-17-00764 и № 14-50-00095).

Экспедиционные исследования поддержаны РФФИ (проект № 14-05-05003Кар_а) и РГО (проект № 13-05-41372).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира // Под ред. Котлякова В.М. Т. 2. Кн. 1. М.: ИГ РАН, 1997. 264 с.
2. Бузин И.В., Глазовский А.Ф. Айсберги и ледники Баренцева моря: исследования последних лет. Ч. 1 // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб.: 2008. Вып. 78. С. 66–80.
3. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Гляциологические исследования в Российской Арктике осенью 2007 г. // Земля и вселенная. 2010. № 2. С. 66–74.
4. Горячкин С.В. Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция) // М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
5. Зингер Е.М., Энгельгардт В.В. Снегонакопление и стаивание на леднике Шокальского и прилегающей к нему части Новоземельского ледникового щита // Материалы гляциологических исследований. 1961. Вып. № 3. С. 19–26.
6. Иванов Г.И. Методология и результаты экогеохимических исследований Баренцева моря. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. 153 с.
7. Израэль Ю.А., Цыбань А.В., Вакуловский С.М. Радиоактивное загрязнение морей и океанов // Метеорология и гидрогеология. 1994. № 10. С. 15–23.
8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Мирошников А.Ю. и др. Геохимическая структура и радиационное состояние прибрежных ландшафтов заливов Карского моря Новой Земли // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 3. С. 342–346.
10. Мирошников А.Ю. Закономерности распределения радиоцезия в донных отложениях Карского моря // Геоэкология. 2012. № 6. С. 516–526.
11. Михайлов В.Н. Ядерные испытания в Арктике: Научно-публицистическая монография в двух книгах. М.: ОАО “Московские учебники”, 2006. Т. 1. 463 с. Т. 2. 455 с.
12. Никольский Д.Б. Разработка профильно-площадной методики спутникового зондирования ост- ровных ледников Российского Заполярья: Дис. ... канд. геогр. наук: 25 00 31. М., 2013. 221 с.
13. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря (Белая книга – 2000). М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
14. Степанец О.В., Кодина Л.А., Лигаев А.Н. и др. Радиогеохимические исследования особенностей распределения радионуклидов в местах захоронения твердых радиоактивных отходов вблизи архипелага Новая Земля // Геохимия. 2006. № 12. С. 1315–1324.
15. Чижов О.П., Корякин В.С., Давидович Н.В. и др. Оледенение Новой Земли. М.: Наука, 1968. 338 с.
16. Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Маликова И.Н. и др. Сравнительная характеристика современного радиоактивного загрязнения территорий Западной Сибири, прилегающих к Семипалатинскому и Новоземельскому полигонам (на примере Алтая и Пур-Тазовского междуречья) // Сибирский экологический журнал. 2000. № 1. С. 51–60.
17. Korobova E.M., Ukraintseva N.G., Surkov V.V., Brown J.V. Geochemical study of the tundra landscapes in the Yenisey delta and gulf area // Permafrost. Proceedings of the Eight International Conference on Permafrost. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003. P. 601–606.
18. Pinglot J.F., Pourchet M., Lefauconnier B. et al. Natural and artificial radioactivity in the Svalbard glaciers // J. of Environmental Radioactivity. 1994. V. 25. Is. 1–2. P. 161–176.
19. Šakalys J., Kvietkus K., Sucharova J. et al. Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005 // Chemosphere. 2009. № 76. P. 91–97.
20. Strand P. Radioactive contamination in the Arctic Seas. Marine pollution. Proceedings of a symposium held in Monaco, 5–9 October 1998 // IAEA TECDOC-1094, IAEA. Vienna. 1999. P. 690.

Radioecological Research on the North Novaya Zemlya Archipelago

A. Yu. Miroshnikov, N. P. Laverov, R. A. Chernov, A. V. Kudikov, A. A. Ysacheva, I. N. Semenov,
R. A. Aliev, E. E. Asadulin, M. V. Gavrilo

The research of environment components radioactive conditions has been conducted in a due course of complex research works in the framework of 63rd RV Academic Mstislav Keldish cruise in the area of Cape Zhelanie and area of ice dome of Northern island of Novaya Zemlya archipelago. According to the results of landscape-geochemical and radio-glaciological research – Northern ice dome has been determined as a secondary source of radionuclides deposited there during the nuclear tests in the atmosphere of Northern Novaya Zemlya Testing Site. Radiocesium activity levels of 450–640 Bq/kg have been observed in the few samples from the proglacial area at the border of the Northern ice dome. No significant activity has been identified after studying ice cores from three core holes (up to 5.4 m deep). Glaciological research of the previously unstudied glacier allowed establishing the depth of radiation-contaminated layer of 15–20 m at the supply border. Such research has been never conducted by neither Russian nor international scientists.