

# Путешествия, открытия

УДК 551.32(091)

doi:10.15356/2076-6734-2016-4-561-574

## 50 лет геофизических исследований ледников в Институте географии АН СССР/РАН (1966–2016)

© 2016 г. В.М. Котляков, Ю.Я. Мачерет\*

Институт географии РАН, Москва, Россия

\*macheret 2011@yandex.ru

## Fifty years of geophysical researches of glaciers in Institute of Geography, the Russian Academy of Sciences, 1966–2016

V.M. Kotlyakov, Yu.Ya. Macheret\*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*macheret 2011@yandex.ru

Received April 29, 2016

Accepted August 2, 2016

Key words: gravimetry, mountain glaciers, polar glaciers, radio-echo sounding

### Summary

In 1967–2015, Institute of Geography of the USSR/Russian Academy of Sciences together with other organizations carried out field expeditions in different areas of mountain and polar glaciations in many regions: the Polar Urals, Caucasus, Pamir, Zailiysky and Jungar Alatau, Tien-Shan, Pamir-Alai, the Kamchatka Peninsula, the Pyrenees, the Arctic – Spitsbergen, Novaya Zemlya, Franz Josef and Severnaya Zemlya, and Antarctica – on the ice flow B, and in the sub-Antarctic – Islands King George, Galindez, and Livingston. The gravimetric and ground and aerial radar observations were made in these expeditions. About 300 glaciers of different morphological types and sizes with cold, subpolar and temperate thermal regime were studied.

Basic results of these studies are the following: (1) the new data on the ice thicknesses, ice volumes, subglacial relief, internal structure, and thermal state of the glaciers were obtained; (2) the two-layered (polythermal) glaciers consisting of the upper layer of cold ice and the lower layer of temperate water-filled ice had been revealed in Svalbard for the first time; spatial distribution of cold, polythermal and temperate glaciers had been determined; (3) the evidences were obtained that measured changes in thickness of the upper cold ice layer in polythermal glaciers can be used to estimate the long-period variations of regional climates and serve as regional paleothermometers; (4) methods for estimating the water content in temperate and polythermal glaciers from the RES data were developed; and its space-time variations in temperate ices of the Svalbard glaciers were estimated since even small water content inside of them can noticeably change their dynamic behavior; (5) methods for estimating the ice volume within glaciers in large regions of mountain and polar glaciations had been created; the ice storages were estimated in Svalbard, Franz Josef Land, Dzhungrsky Alatau, the Great Caucasus, and Mt. Elbrus; (6) detailed data on the ice thicknesses and the subglacial relief had been obtained for 40 glaciers in framework of different national and international programs and projects; the data can be used to solve a wide range of practical and theoretical problems, including numerical modeling.

These studies demonstrated the following: (1) the use of monopulse radars VIRL-6 and VIRL-7 of decimeter range (the central frequency is 20 MHz) with digital recording of the radar and GPS data is quite efficient for ground-based and airborne (from helicopters) radio-echo sounding of mountain and polar glaciers with their ice thicknesses up to 500–600 m; (2) it was found that thicknesses of glaciers in the Caucasus and Tien Shan can reach 330–430 m, while in regions of mountain, ice-sheet and transitional glaciation on the Spitsbergen Archipelago – 300, 560 and 600 m, respectively, on the ice caps of the Franz-Josef Land and Severnaya Zemlya – 450 and 813 m, and on King George and Livingston Islands (Sub-Antarctica) – 330 and 500 m; (3) large parts of ice caps and outlet glaciers in Svalbard, Franz Josef Land, Severnaya Zemlya which beds were located below the sea level were found. Precisely these parts can be undergone quick shortening due to climate warming, and, thus, cause formation of icebergs making threats for ships and gas-oil marine platforms in the Barents and Kara seas; (4) data of the measurements made possible to calculate volumes of a number of investigated glaciers and ice caps and to estimate the ice storages in large areas of mountain and polar glaciations (the Jungar Alatau, Great Caucasus, Spitsbergen, Franz Josef Land); (5) decreasing of glacier volumes on the Franz Josef Land and some Spitsbergen glaciers for the last decades had been estimated.

Analysis of the data obtained had shown that considerable part of polythermal glaciers in Spitsbergen belong to type of surging glaciers; they have the winter englacial runoff and form the near-glacier icings. It allows considering such glaciers as dynamically unstable, predisposed to surges as well as possible sources of winter water supply and additional sources of paleoinformation about long-period variations of regional climate.

Поступила 29 апреля 2016 г.

Принята к печати 2 августа 2016 г.

**Ключевые слова:** горные ледники, гравиметрия, полярные ледники, радиозондирование.

Рассказано об истории и основных результатах геофизических исследований ледников, выполненных в Институте географии АН СССР/РАН в период с 1966 по 2016 г. группой специалистов по изучению толщины и строения ледников с применением геофизических методов. Такие данные необходимы для оценки запасов пресной воды в ледниках и их вклада в изменение уровня Мирового океана, а также для прогнозирования и реконструкции динамики ледников.

### Районы исследований

Полевые геофизические исследования начались в 1967 г. с гравиметрических и радиолокационных измерений на леднике Марух на Кавказе и были продолжены в 1968 г. на ледниках ИГАН и Обручева на Полярном Урале и на леднике Гергетти на Кавказе. В 1969 г. гравиметрические измерения были выполнены на леднике Медвежий на Памире, а в 1970–1971 гг. — на ледниках Безенги, Колка и Майли на Кавказе (рис. 1).

В 1974–1975, 1977–1979 и 1984 гг. на 140 ледниках Шпицбергена и Северо-Восточной Земли (рис. 2, а) наземные и воздушные радиолокационные исследования были проведены Шпицбергенской гляциологической экспедицией Института географии АН СССР (начальник экспедиции Е.М. Зингер). В 1994 и 1997 гг. аэро-радиолокационные измерения выполнены на Земле Франца-Иосифа (см. рис. 2, б) и Северной Земле (см. рис. 2, в).

В 1981–1982, 1986 и 1990 гг. наземные радиолокационные измерения проведены на Тянь-Шане (ледники Туяксу, Давыдова и Южный Иньльчек), Памиро-Алае (ледник Абрамова), в 2011–2013 гг. работы продолжены на Кавказе (ледники Марух, Безенги и Джанкуат и Западное ледниковое плато Эльбруса), в 2012–2013 гг. на Тянь-Шане (ледники Давыдова, Сары-Тор и Туяксу). В 2012–2014 гг. были выполнены воздушные измерения на ледниках Большого Кавказа, а также на северном и южном склонах Эльбруса.

В 1988 г. сотрудники Института географии АН СССР принимали участие в наземных радиолокационных исследованиях на ледниках Ханс и Фритьоф на Шпицбергене, в сезон 1991/92 г. — на ледяном потоке В в Антарктиде, в 1994 г. — на

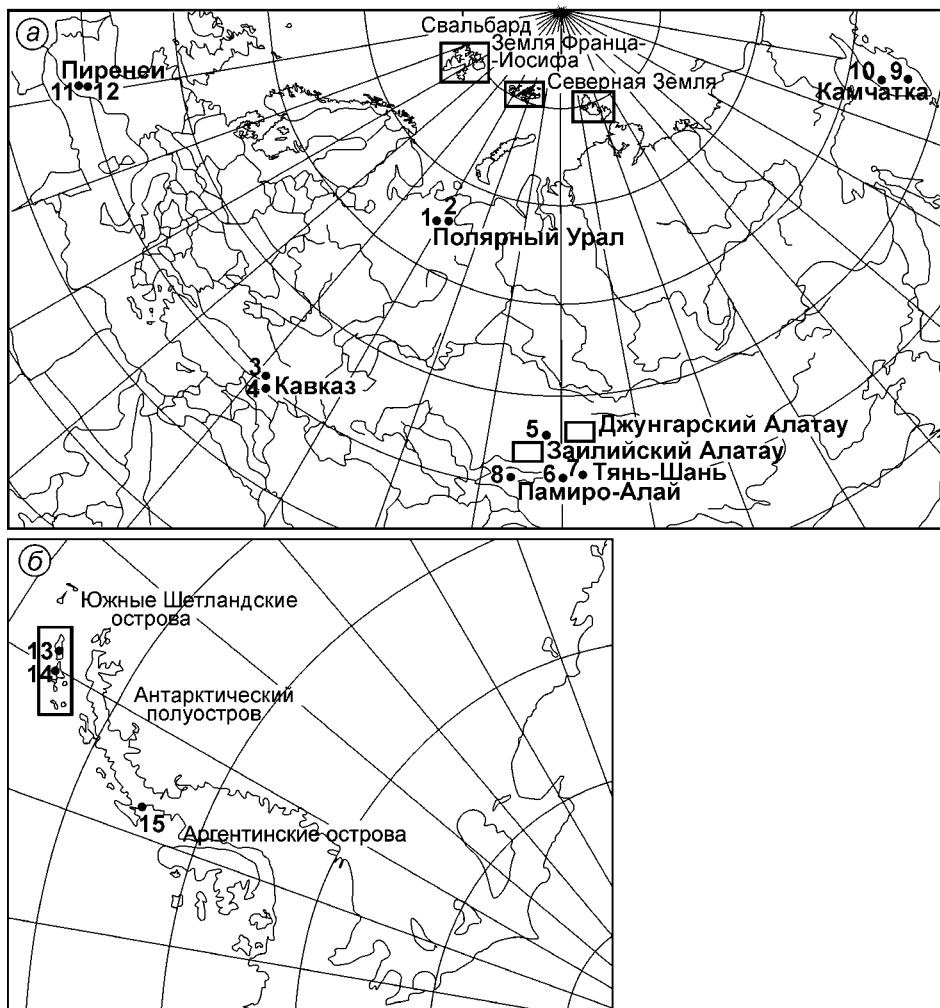
ледниках Маладето и Аннета в Пиренеях, в 1995–2000, 2003 и 2006 гг. — на ледниковых куполах на островах Кинг-Джордж, Галиндес и Ливингстон в Субантарктике, а в 2000 и 2001 гг. — на леднике Кориго и ледниковом куполе Горшкова на вулкане Ушковский на Камчатке.

В 1999, 2003–2006 гг. наземные радиолокационные исследования на Шпицбергене были продолжены на ледниках Альдегонда, Ханс, Фритьоф и ледниковом плато Амундсена, а в 2010–2013 гг. измерения выполнены ещё на 13 ледниках на западе Земли Норденшельда, включая тестовые политермические ледники Восточный Грэнфьорд и Фритьоф наземного, приливного и пульсирующего типа.

В 2005, 2007, 2008, 2014 и 2015 гг. воздушные исследования проведены на ледниках Новой Земли, Земли Франца-Иосифа и Северной Земли с вертолётов, базировавшихся на борту НИС «Михаил Сомов», «Академик Трешников» и атомного ледокола «Таймыр».

Таким образом, в 1967–2015 гг. экспедициями Института географии при поддержке и участии различных организаций наземные и воздушные радиолокационные исследования были выполнены в ряде районов горного и полярного оледенения: на Полярном Урале, Кавказе, в Заилийском и Джунгарском Алатау, на Тянь-Шане, Памиро-Алае, Камчатке, в Пиренеях, на Шпицбергене, на островах Российской Арктики и в Антарктике.

Эти исследования охватили более 300 ледников разных морфологических типов и размеров, относящихся к ледникам холодного, субполярного и тёплого типов. На 28 ледниках — объектах гляциологических исследований по различным национальным и международным проектам и программам — были проведены детальные съёмки толщины льда и подлёдного рельефа, а на



**Рис. 1.** Геофизические исследования Института географии АН СССР/РАН в областях горного и полярного оледенения в Северном (а) и Южном (б) полушариях.

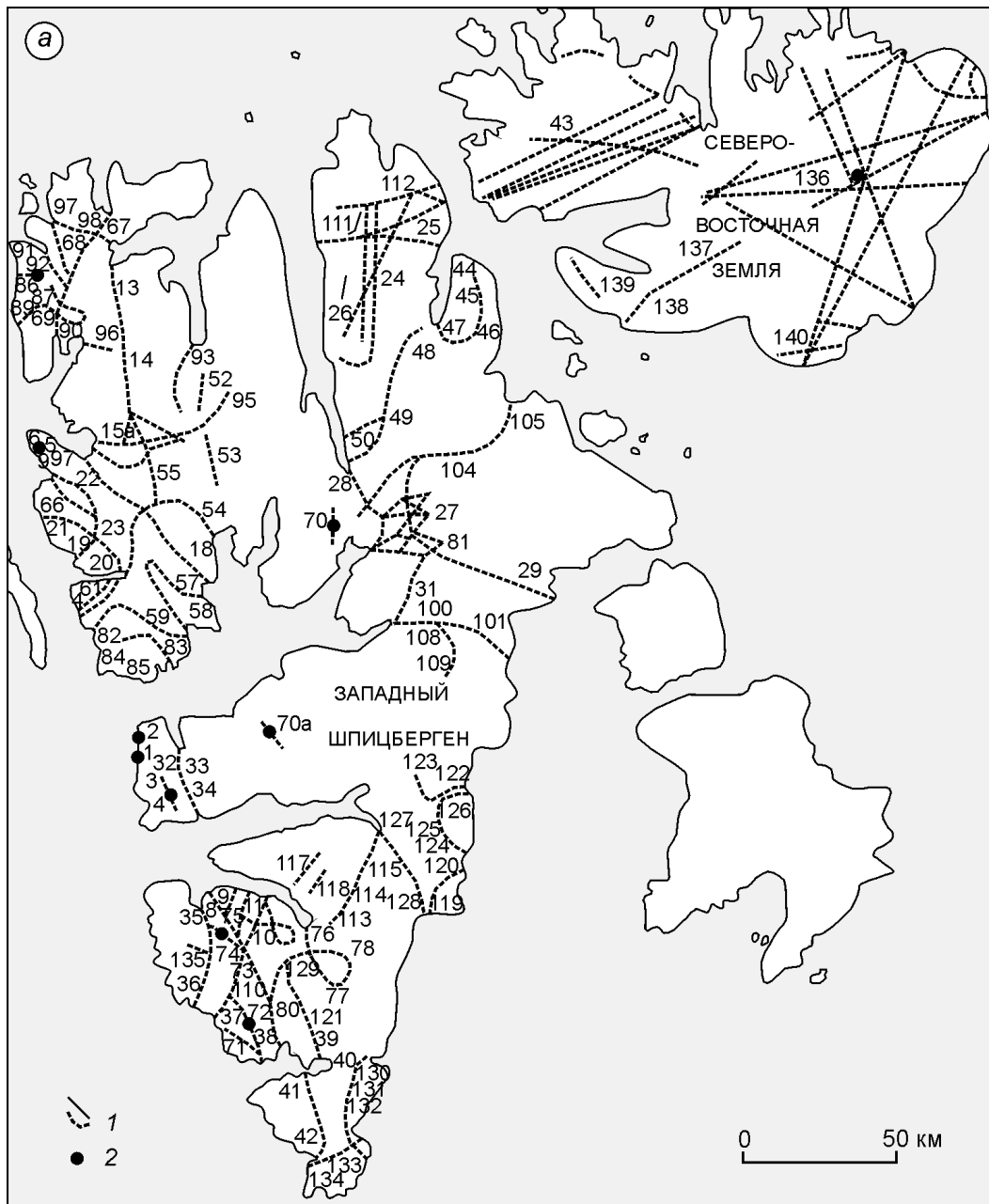
Цифрами обозначены: а – Полярный Урал – ледники ИГАН (1) и Обручева (2); Кавказ – ледники Гергети (3) и Безенги (4); Заилийский Алатау – ледник Туяксу (5); Тянь-Шань – ледники Давыдова и Сары-Тор (6), ледник Южный Иньльчек (7); Памиро-Алай – ледник Абрамова (8); Камчатка – ледник Корыто (9), ледниковый купол Горшкова на вулкане Ушковский (10); Пиренеи – ледники Аннета (11) и Маладето (12); б – Южные Шетландские острова – острова Кинг-Джордж (13) и Ливингстон (14), ледники Джонсонс, Хард и ледниковое плато Боулес; Аргентинские острова – о. Галиндес, ледниковый купол Домашний (15). Прямоугольниками на (а) показаны районы аэрорадиолокационных исследований на Шпицбергене (рис. 2, а), на Земле Франца-Иосифа (рис. 2, б) и Северной Земле (рис. 2, в)

**Fig. 1.** Regions of ground-based (black circles) and airborne (rectangles) radio-echo sounding (RES) investigations in areas of mountain and polar glaciation in north (а) and south (б) hemispheres.

Numeral snow: а – Polar Ural: glaciers IGAN (1) and Obruchev (2); the Caucasus: glaciers Gergiti (3) and Bezengi (4); Zailiysky Alatau: Tuyksu Glacier (5); Tien Shan: Davydov and Sary-Tor glaciers (6), South Inylchek Glacier (7); Pamirs-Alai: Abramov Glacier (8); Kamchatka: Kotyto Glacier (9) and Gorshkov ice cap at Ushkovsky volcano (10); Pyrenees: Anneta (11) and Maladeto (12) glaciers; б – South Shetland Islands – King George Island (13), Livingstone Island (14), Johnsons and Hurd glaciers, Bowles ice plateau; Argentinean Islands, Galindes Island: Domashniy ice cap (15). Rectangles in (а) show the areas of airborne RES measurements in Svalbard (Fig. 2, а), Franz Josef Land (Fig. 2, б) and Severnaya Zemlya (Fig. 2, в)

трёх из них – радиофизические исследования, включавшие повторные измерения скорости распространения радиоволн и мощности отражённых сигналов для оценки гидротермического состояния ледников.

Исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), Федеральной целевой программой «Шпицберген», программами Отделения наук о Земле и Президиума РАН и проводились в со-

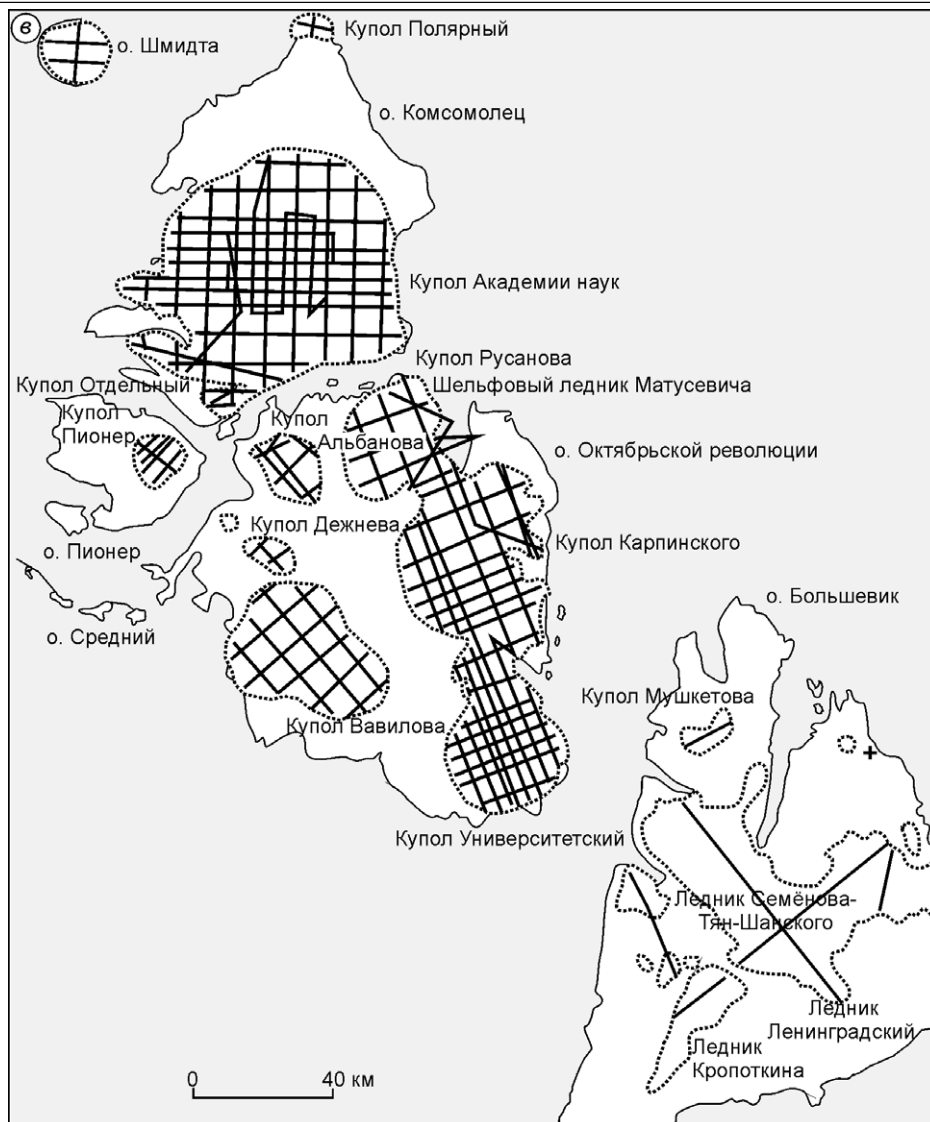
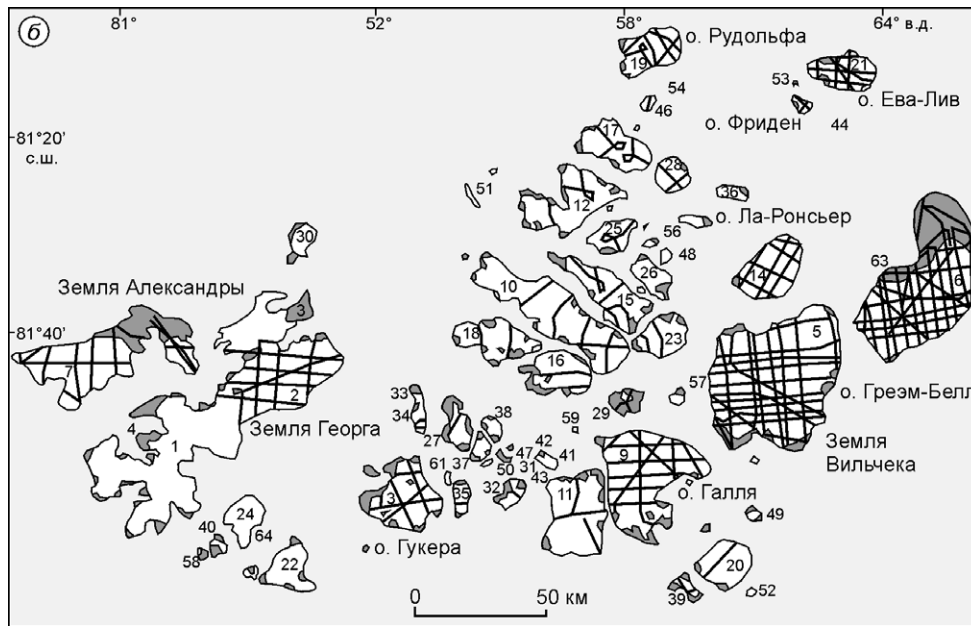


**Рис. 2.** Воздушные (1) и наземные (2) радиолокационные исследования ледников (номера обозначены исследованные ледники) на Шпицбергене в 1974, 1975, 1977–1979 и 1984 гг. (а), Земле Франца-Иосифа в 1994 г. (б) и Северной Земле в 1997 г. (в)

**Fig. 2.** Airborne (1) and ground-based (2) radio-echo sounding (RES) investigations of glaciers (numbered) in Svalbard in 1974, 1975, 1977–1979 and 1984 (a), Franz Josef land in 1994 (b) and Severnaya Zemlya in 1997 (v)

трудничестве с рядом университетов и институтов. Среди них Висконсинский университет (США), университет Рио-Гранде-дель-соль (Бразилия), политехнические университеты Валенсии и Мадрида (Испания), Институт полярных исследований имени Скотта (Великобритания), Институт низких температур Университета Хок-

кайдо (Япония), Институт Альфреда Вегенера (Германия), Институт геофизики Польской академии наук и Силезский университет (Польша), Томский и Московский государственные университеты, Марийский политехнический институт им. А.М. Горького, Ленинградский электротехнический институт, Арктический и Антарктиче-



ский научно-исследовательский институт, Институт вулканологии РАН, Институт географии МОН Республики Казахстан, Среднеазиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Узбекистан), Киргизское управление картографии, Центрально-Азиатский институт исследования Земли (Киргизия).

В разные годы в радиолокационных исследованиях ледников принимали участие сотрудники Института географии: Ю.Я. Мачерет (с 1967 г.), А.Б. Журавлев (с 1971 г.), А.Ф. Глазовский (с 1985 г.), М.Ю. Москалевский (с 1986 г.), И.И. Лаврентьев (с 2001 г.), В.Н. Михаленко и С.С. Кутузов (с 2005 г.), Г.А. Носенко (с 2014 г.), Р.А. Чернов (с 2015 г.) В этих исследованиях также участвовали сотрудники других учреждений: из России – В.С. Лучиников, В.Ш. Берикашвили, А.Н. Бабенко, А.Н. Громыко, О.А. Лебедев, А.Н. Коляда, Н.П. Сидоров, Д.Я. Муравьев, С.А. Никитин, Д.А. Петраков, Н.В. Коваленко, из Бразилии – Д. Симоес, из Великобритании – Д. Даудсвел, М. Горман, М. Вилланс, из Испании – Ф. Наварро, Х. Отеро, Х. Лапасаран, Ф. Мачио, из Киргизии – В.А. Кузмиченок, Р.А. Усубалиев, из Норвегии – Й. Хаген, из Польши – П. Гловацки, Я. Яния, из Финляндии – Д. Мур, из Узбекистана – Е.В. Василенко, К. Шапо, из Швеции – П. Холмлунд, из Японии – Т. Шираива.

### **Аппаратура и методика геофизических исследований**

Гравиметрические измерения силы тяжести выполнялись гравиметрами ГАК-3М в отдельных точках ледника вдоль поперечных профилей. Это позволило получить данные о толщине льда с погрешностью около 10–20 %. Более эффективным оказалось применение радиолокационного метода, позволявшего при перемещении радиолокатора по поверхности ледника или полёте над ним непрерывно или дискретно регистрировать отражения от ложа и внутренних неоднородностей и по времени запаздывания и амплитуде этих отражений более точно определять толщину льда и исследовать внутреннее строение ледников и условия на их ложе.

В 1967–1975 гг. для радиолокационных измерений с наземного и воздушного транспорта при-

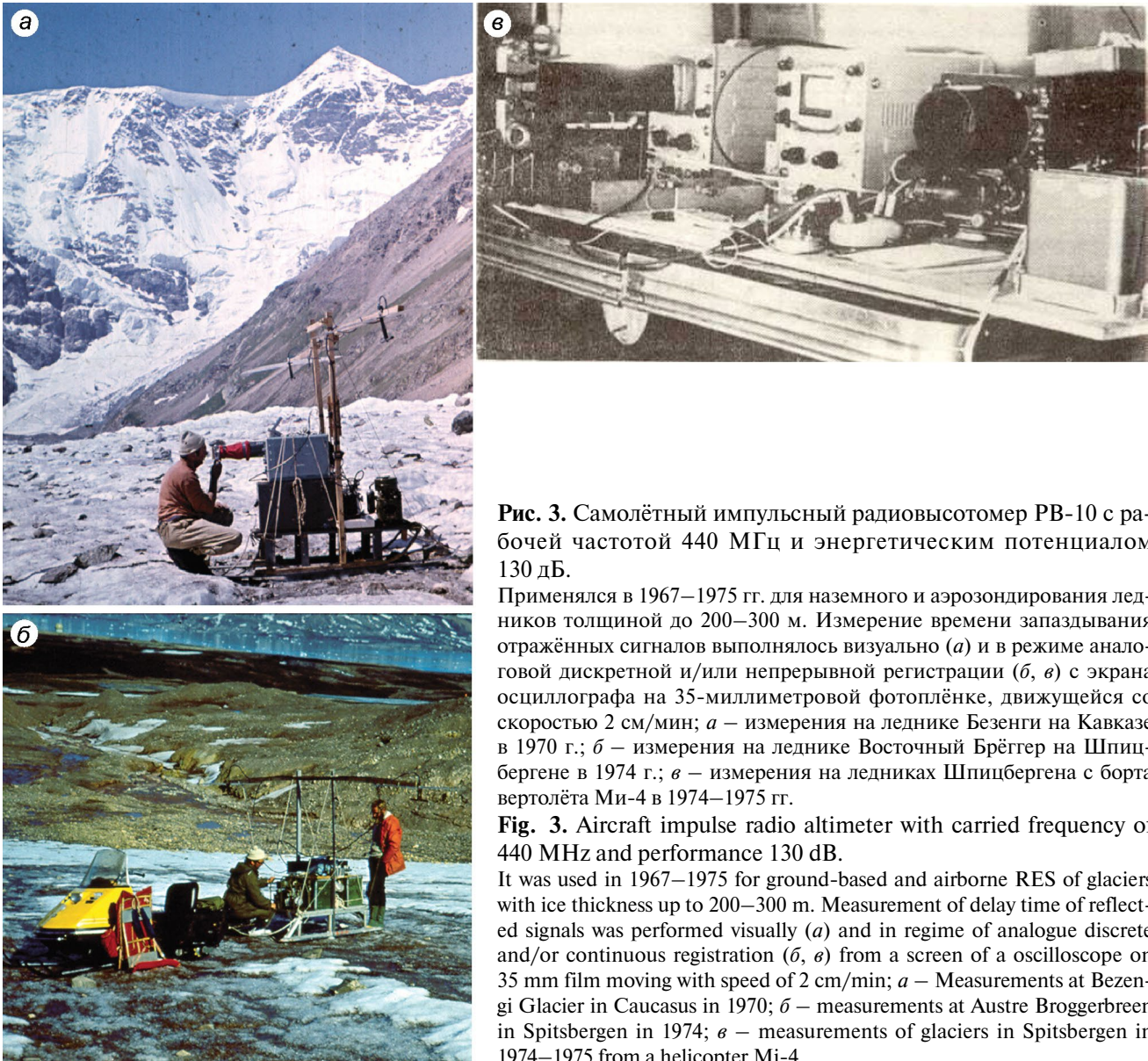
менялись самолётные радиовысотометры РВ-10 и РВ-17 дециметрового диапазона с рабочей частотой 440 МГц, имевшие ограниченную глубину зондирования (до 200–300 м). Сначала измерения времени отражений выполнялись с экрана осциллографа визуально, а затем – в режиме аналоговой дискретной и/или непрерывной регистрации на 35-миллиметровой фотоплёнке (рис. 3).

Позднее, с учётом особенностей строения ледников разных типов, распространения в них радиоволн и новых технических возможностей радиоэлектроники, компьютерной и космической техники были разработаны специализированные импульсные и моноимпульсные «ледовые» локаторы метрового, дециметрового и декаметрового диапазонов с цифровой регистрацией радарных и навигационных GPS-данных и эффективные методы их компьютерной обработки и интерпретации. Это значительно расширило область применения радиолокационных методов в гляциологии и существенно повысило их точность и информативность, особенно при исследовании внутреннего строения и радиофизических параметров ледников (скорости распространения и мощности отражений радиоволн). Увеличение глубины зондирования ледников было достигнуто двумя путями – за счёт повышения энергетического потенциала локатора и сужения диаграммы направленности антенн и за счёт уменьшения рабочей длины волны локатора. Это позволило уменьшить рассеяние радиоволн на неоднородностях и включениях воды в тёплых и субполярных ледниках и повысить достоверность обнаружения отражений от ложа на фоне отражений-помех.

Для выбора рабочей частоты локатора и конструкции антенн в 1976 г. на ледниках Обручева и ИГАН на Полярном Урале были выполнены измерения в диапазоне частот 400–900 МГц и в 1981 г. – на ледниках Туюксу в Заилийском Алатау, а в 1984 г. на ледниковом плато Амундсена на Шпицбергене прошли полевые испытания аппаратуры декаметрового диапазона с резистивно-нагруженными антеннами.

Оба этих подхода были реализованы в Марийском политехническом институте им. А.М. Горького при участии Института географии АН СССР: в 1977–1979 гг. для наземного и аэрорадиозондирования ледников толщиной до 600 м был разработан локатор РЛС-620 с ра-





**Рис. 3.** Самолётный импульсный радиовысотомер РВ-10 с рабочей частотой 440 МГц и энергетическим потенциалом 130 дБ.

Применялся в 1967–1975 гг. для наземного и аэрозондирования ледников толщиной до 200–300 м. Измерение времени запаздывания отражённых сигналов выполнялось визуально (*а*) и в режиме аналоговой дискретной и/или непрерывной регистрации (*б*, *в*) с экрана осциллографа на 35-миллиметровой фотоплёнке, движущейся со скоростью 2 см/мин; *а* – измерения на леднике Безенги на Кавказе в 1970 г.; *б* – измерения на леднике Восточный Брёггер на Шпицбергене в 1974 г.; *в* – измерения на ледниках Шпицбергена с борта вертолёта Ми-4 в 1974–1975 гг.

**Fig. 3.** Aircraft impulse altimeter with carried frequency of 440 MHz and performance 130 dB.

It was used in 1967–1975 for ground-based and airborne RES of glaciers with ice thickness up to 200–300 m. Measurement of delay time of reflected signals was performed visually (*a*) and in regime of analogue discrete and/or continuous registration (*b*, *v*) from a screen of an oscilloscope on 35 mm film moving with speed of 2 cm/min; *a* – Measurements at Bezen-gi Glacier in Caucasus in 1970; *b* – measurements at Austre Broggerbreen in Spitsbergen in 1974; *v* – measurements of glaciers in Spitsbergen in 1974–1975 from a helicopter Mi-4

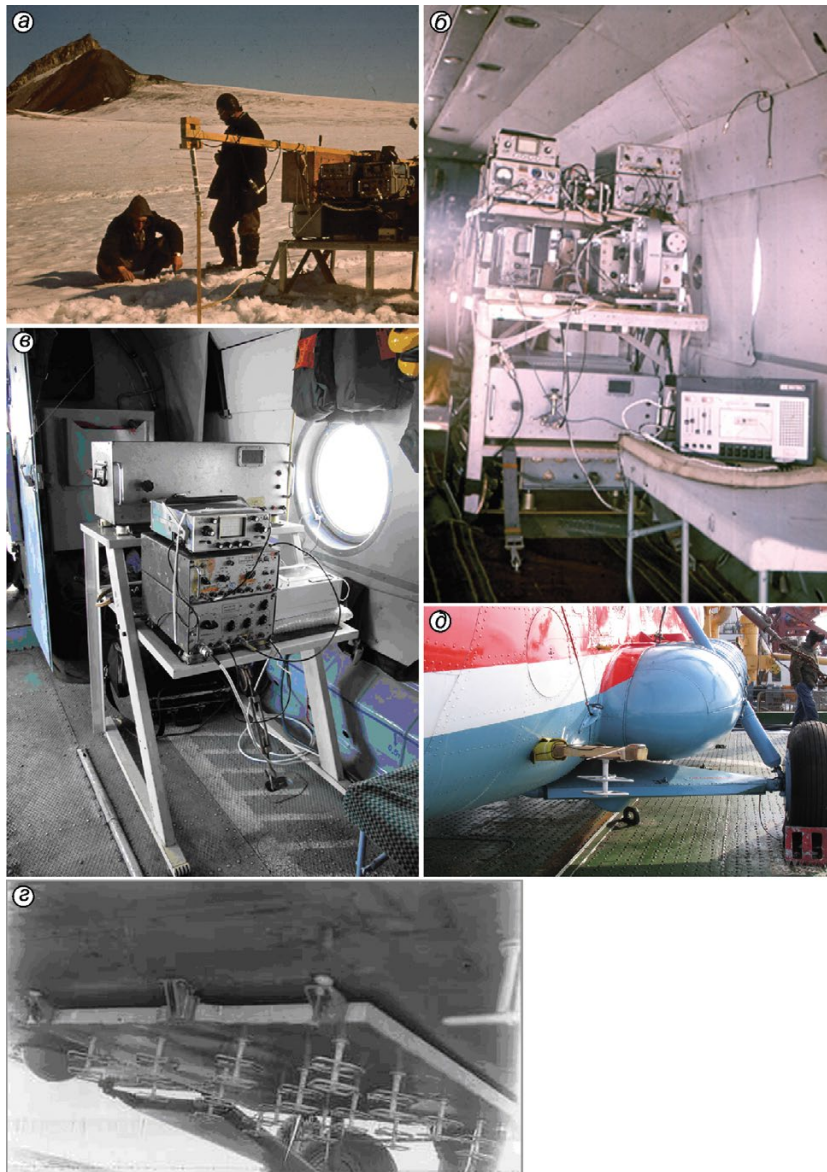
бочей частотой 620 МГц и узконаправленными антеннами, обеспечившими увеличение энергетического потенциала локатора (включая антенны) до 185 дБ и глубины зондирования ледников до 500–600 м (рис. 4, *б*), а в 1982–1984 гг. – локатор МПИ-8 конструкции Е.В. Василенко с центральной частотой 1 и 8 МГц с приёмной и передающей резистивно-нагруженными антеннами длиной 8 и 40 м каждая для наземного зондирования тёплых и холодных ледников толщиной до 600–1200 м (рис. 5).

Позднее, в 2005 г., локатор РЛС-620 был снабжён системой цифровой автоматической регистрации радарных и навигационных GPS

данных (см. рис. 4, *д*). Для наземного зондирования ледников толщиной до 300 м в 1994 г. Е.В. Василенко разработал портативный видеоимпульсный локатор ВИРЛ-1 с центральной частотой 40 МГц, антеннами длиной 2,5 м и покадровой регистрацией данных с экрана осциллографа (рис. 6).

До 1999 г. регистрация отражений велась с экрана осциллографа на фотоплёнку в дискретном или непрерывном режиме, а привязка профилей и точек измерений выполнялась геодезическим путём или визуально (во время полётов).

В 1999–2015 гг. для наземных и воздушных измерений стали применять разработанные



**Рис. 4.** Импульсный радиолокатор РЛС-620 с несущей частотой 620 МГц, общим энергетическим потенциалом (включая антенны) 185 дБ и глубиной зондирования ледников до 600 м.

Применялся в 1977–1979 и 1988 гг. для наземных измерений на леднике Фритъюф на Шпицбергене (а), в 1981–1982 гг. для наземных измерений на леднике Туюксу в Заилийском Алатау, в 1977–1999 и 1984 гг. для аэрозондирования с вертолёта Ми-8 ледников на Шпицбергене и Северо-Восточной Земле (б), в 1981 г. для аэрозондирования ледников Заилийского и Джунгарского Алатау (в), в 1994 г. для аэрозондирования ледников на Земле Франца-Иосифа (г) и в 2005–2008 гг. для аэрозондирования ледников на Новой Земле и Земле Франца-Иосифа (д). Для наземных измерений использовались логопериодические антенны (а), для аэрозондирования ледников – 16-элементная приёмо-передающая антенна конструкции Е.В. Василенко с узкой (16°) диаграммой направленности и усилением 39 дБ (в), а в 2005–2008 гг. – антенны типа «двойной квадрат» с широкой (60°) диаграммой направленности и усилением 12 дБ (д)

**Fig. 4.** Impulse ice penetrating radar RLS-620 with carried frequency of 620 MHz, total performance (including antenna) 185 dB and depth sounding of glaciers up to 600 m.

It was used in 1977–1979 and 1988 for ground-based RES at Fridtjovbreen (a), in 1981–1982 – for ground-based RES of Tuyuksu Glacier in Zailiysky Alatau, in 1977–1999 and 1984 – for airborne RES of glaciers in Spitsbergen and Nordauslandet (b), in 1981– for airborne RES of glaciers in Zailiysky and Dzhungarsky Alatau (v), in 1994 – for airborne RES of glaciers in Franz Josef Land (g), in 2005–2008 – for airborne RES of glaciers in Novaya Zemlya and Franz Josef Land (d). For ground-based RES the logoperiodic antennas were used (a), for airborne RES – the 16-element transmitting-receiving antenna with narrow (16°) directivity and high (39 dB) gain developed by E.V. Vasilenko (v) and in 2005–2008 – the antennas of «double square» type of with large (60°) directivity and lower (12 dB) gain (d)





**Рис 5.** Моноимпульсный локатор МПИ-8 с центральными частотами 1 и 8 МГц и глубиной зондирования ледников до 600–1200 м.

Применялся в 1982 г. для наземного зондирования ледника Туяксу в Заилийском Алатау, в 1984 г. — для зондирования ледникового плато Амундсена, в 1985 г. — ледника Давыдова на Тянь-Шане, в 1986 г. — ледника Абрамова на Памиро-Алае, в 1988 г. — ледников Ханс и Фритъёф на Шпицбергене, в 1990 г. — ледника Южный Иньльчек на Тянь-Шане, в 1991/92 г. — ледяного потоке В в Западной Антарктиде. Регистрация отражений в точках измерений велась с экрана осциллографа на 35-миллиметровую фотоплёнку

**Fig. 5.** Monopulse radar MPI-8 with central frequency of 1 MHz and 8 MHz and glacier depth sounding up to 600–1200 m.

It is used in 1982 for ground-base RES of Tuyksu Glacier in Zailisky Alatau, in 1984 — of Amundsenisen in Spitsbergen, in 1985 — of Davydov Glacier in Tien Shan, in 1986 — of Abramov Glacier in Pamirs-Alai, in 1988 — of Hansbreen and Fridtjovbreen in Spitsbergen, in 1990 — South Inylchek Glacier in Tien Shan, in 1991/92 — of upstream B in West Antarctica. Registration of reflections at measurement points was performed on 35 mm film.

Е.В. Василенко «ледовые» моноимпульсные локаторы ВИРЛ с центральной частотой 20 МГц и системой цифровой регистрации радарных и навигационных GPS-данных. Первые модификации локаторов этого типа (ВИРЛ-2 и ВИРЛ-2а) с были применены в 1999 г. для наземного зондирования ледника Альдегонда на Шпицбергене и в 2000 г. ледников Джонсонс и Хард на о. Ливингстон; на леднике Ханс на Шпицбергене они также применялись в 2003 и 2004 гг. для измерения суточных вариаций мощности отражённых сигналов из его толщи и от ложа (рис. 7).

В последующих модификациях (ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7) характеристики приёмно-передающего



**Рис. 6.** Видеоимпульсный радиолокатор ВИРЛ-1 с центральной частотой 40 МГц.

Применялся в 1995–1996 гг. для наземного зондирования ледникового купола на о. Кинг-Джордж в Субантарктике с толщиной льда до 330 м

**Fig. 6.** Video impulse radar VIRL-1 with central frequency of 40 MHz.

It was used in 1995–1996 for ground-base RES of ice cap in King George Island in Subantarctica with ice thickness up to 330 m

и регистрирующего устройств были улучшены, что позволило увеличить глубину зондирования тёплых и субполярных ледников до 600 м. Локатор ВИРЛ-6 был впервые применён в 2000 г. для наземного зондирования ледника Корыто, а затем в 2003–2005 и 2010–2013 гг. — для зондирования ледников на Шпицбергене (рис. 8).

Благодаря небольшому (около 10 кг) общему весу приёмно-регистрирующего и передающего устройств и источников электропитания локатор вместе с приёмной и передающей резистивно-нагруженными антеннами длиной 2,8 м каждая мог транспортироваться по леднику одним снегоходом на двух санях или двумя людьми на санях или в рюкзаках; ещё один человек был нужен, чтобы поддерживать в натянутом состоянии передний конец антенн или везти передние сани; тормозом для задней антенны служил снежный якорь.

Применение цифровой регистрации радарных и навигационных GPS-данных позволило вместо фотоплёнок и увеличенных отпечатков с них использовать для визуализации и обработки радарных данных компьютерные программы, что значительно ускорило и упростило построение разрезов и карт толщины льда и улучшило точность привязки профилей радиозондирования. Применение более низких частот значительно



**Рис. 7.** Моноимпульсные локаторы ВИРЛ-2 и ВИРЛ-2а с центральной частотой 20 МГц. Применялись в 1999 г. для наземного радиозондирования ледника Альдегонда на Шпицбергене (а), в 2000 г. — ледников Джонсонс и Хард (б) на о. Ливингстон, в 2003–2004 гг. — на политермическом леднике Ханс на Шпицбергене для измерения суточных вариаций мощности отражённых сигналов из ледниковой толщи и от ложа (в)

**Fig. 7.** Monopulse radars VIRL-2 and VIRL-2a with central frequency of 20 MHz. They were used in 1999 for ground-based RES of Aldegondabreen in Spitsbergen (a) and in 2000 — of glaciers Johnons and Hurd (b) in Livingston Island, in 2003–2004 — for measurements of daily variations of power of reflected signals from glacier sequence and bedrock of Hansbreen in Spitsbergen

уменьшило рассеяние радиоволн на неровностях поверхности и включениях воды в снежно-фирновой и ледяной толщах и позволило зондировать сильно трещиноватые, тёплые и политермические ледники толщиной до 600 м, на которых применение 440 МГц и 620 МГц локаторов не давало удовлетворительных результатов.

В 2012–2015 гг. для воздушных измерений были приспособлены локаторы ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7, смонтированные на специальной ферме, подвешиваемой на длинном тросе под фюзеляжем вертолёта (рис. 9). Это позволило

зондировать сильно трещиноватые выводные ледники толщиной до 500 м и оценивать возможность образования ими крупных айсбергов, представляющих опасность для судоходства и морских платформ в бассейнах Баренцева и Карского морей.

Хорошие результаты при аэрозондировании ледников Северной Земли толщиной до 813 м были получены также с применением 100 МГц локатора Института полярных исследований имени Скотта, снабжённого антеннами типа «двойной квадрат» конструкции Е.В. Василенко,





**Рис. 8.** Моноимпульсный локатор ВИРЛ-6 (а–г) с центральной частотой 20 МГц и системой цифровой автоматической регистрации радарных и навигационных GPS-данных.

Применялся в 2000–2001 гг. для наземного зондирования: ледника Корыто (а) и ледникового купола Горшкова на вулкане Ушковский (б) на Камчатке, в 2003 г. – ледника Ханс на Шпицбергене (в) и ледника Шокальского на Новой Земле, в 2004 и 2006 гг. – ледникового плато Амундсена на Шпицбергене, в 2005 и 2010–2013 гг. – ледников на Земле Норденшельда на Шпицбергене, включая тестовые ледники Фритъоф и Восточный Грөнфьорд и ледник Западный Грөнфьорд (г) и ещё 12 ледников в этом районе, в 2000–2006 гг. – ледников Джонсонс и Хард, ледникового купола и ледникового плато Боулес на о. Ливингстон в Субантарктике. Общая длина профилей измерений на всех этих ледниках составила около 900 км. Для синхронизации излучённых и принятых сигналов использовался либо радиоканал (а, б), либо оптоволоконный кабель (в, г)

**Fig. 8.** Monopulse radar VIRL-6 (a–г) with central frequency of 20 MHz and system of automatic digital registration of radar and navigation GPS data (d).

It was used in 2000–2001 for ground-based RES of Koryto Glacier (a) and Gorshkov ice cap at Ushkovsky volcano in Kamchatka (b), in 2003 – of Hansbreen in Spitsbergen (в) and Shokalsky Glacier in Novaya Zemlya, in 2004–2006 – at Amundsenisen in Spitsbergen, in 2005 and 2010–2013 – of glaciers in Nordenskiöld Land in Spitsbergen, including test glaciers Austre Grönfjordbreen and Fridfjovbreen and Vestre Grönfjordbreen (г) and other 12 glaciers in this region, in 2000–2006 – Johnsons and Hurd glaciers, ice cap and Bowles ice plateau in Livingston Island in Subantarctica. The total length of radar profiles at all these glaciers was about 900 km. For synchronization of transmitted and received signals a radio channel (a, б) or a fiber optical cable was used (в, г)

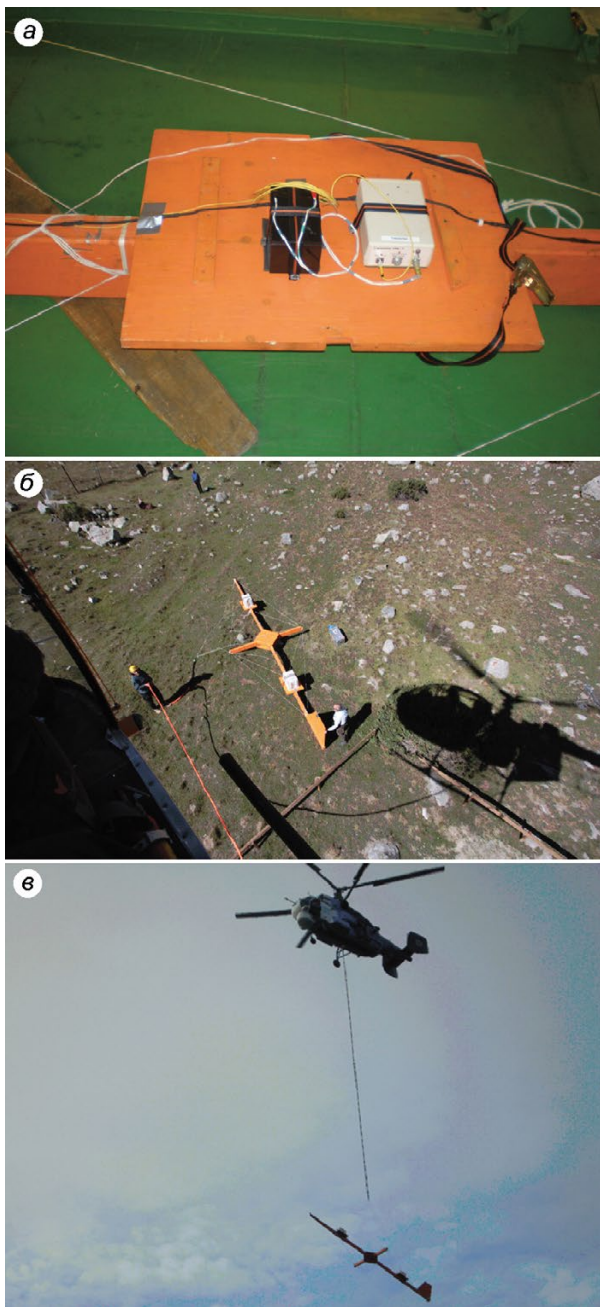
крепившимися на подвесных фермах к обоим бортам вертолёта Ми-8 (рис. 10).

В 2014 г. благодаря организации на Шпицбергене Российского научного центра (РНЦШ) появилась возможность для радиолокационных исследований толщины и структуры снежного покрова на суше и ледниках использовать георадары pulseEKKO Pro с антеннами 500 МГц (рис. 11).

### Основные результаты исследований

В результате проведённых исследований получены следующие важные результаты:

- разработана аппаратура и методика наземных и воздушных измерений толщины, объёма, подлёдного рельефа, внутреннего строения и гидротермического состояния горных и полярных ледников;



**Рис. 9.** Передающее (а) и приёмо-регистрирующее (б) устройства моноимпульсного локатора ВИРЛ-7 с центральной частотой 20 МГц. Локатор смонтирован на специальной ферме, подвешиваемой к вертолету на длинном кабеле (в).

Применялся в 2012–2014 и 2014–2015 гг. для аэрозондирования ледников Большого Кавказа и Эльбруса (в), Новой Земли, Земли Франца-Иосифа и Северной Земли

**Fig. 9.** Transmitting (a) and receiving-recording (b) devices of monopulse radar VIRL-7 with central frequency of 20 MHz. The radar was mounted on special girder suspended to a helicopter on a long cable (c) and applied in 2012–2014 and 2014–2015 for airborne radio-echo sounding of glaciers in Great Caucasus and Elbrus (c), Noway Zemlya and Severnay Zemlya

- получены новые данные о толщине, объёме, внутреннем строении и гидротермическом состоянии ледников в разных районах горного и полярного оледенения, которые могут быть использованы для решения широкого круга практических и теоретических задач, в том числе с применением методов численного моделирования;

- впервые по данным аэроадиозондирования на архипелаге Шпицберген обнаружены ледники политермического типа с верхним слоем холодного льда и придонным слоем тёплого водосодержащего льда; установлено распределение ледников с разным термическим режимом – холодным, тёплым и политермическим;

- установлено, что повторные измерения толщины верхнего слоя холодного льда в политермических ледниках могут быть использованы для оценки длиннопериодных изменений регионального климата и служить в качестве регионального палеотермометра;

- разработаны методы определения содержания воды в тёплых и политермических ледниках по данным радиозондирования и установлены пространственно-временные изменения содержания воды в тёплом льду политермических ледников Шпицбергена;

- разработаны методы оценки объёма ледников в крупных районах горного и полярного оледенения и оценены запасы льда на Шпицбергене и Земле Франца-Иосифа, Большом Кавказе и Эльбрусе, а также изменения объёма ледников на Земле Франца-Иосифа и Шпицбергене за последние десятилетия.

Выполненные исследования показали следующее.

1. Для наземного и аэрозондирования с вертолёта горных и полярных ледников толщиной до 500–600 м весьма эффективно применение моноимпульсных локаторов ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7 декаметрового диапазона (центральная частота 20 МГц) с цифровой регистрацией радарных и навигационных GPS-данных.

2. Толщина ледников на Кавказе и Тянь-Шане может достигать 330–430 м; в районах горного, покровного и сетчатого оледенения на архипелаге Шпицберген – соответственно 300, 560 и 600 м; на ледниковых куполах Земли Франца-Иосифа и Северной Земли – соответственно 450 и 813 м; на островах Кинг-Джордж и Ливингстон в Антарктике – 330 и 500 м. На Шпицбер-



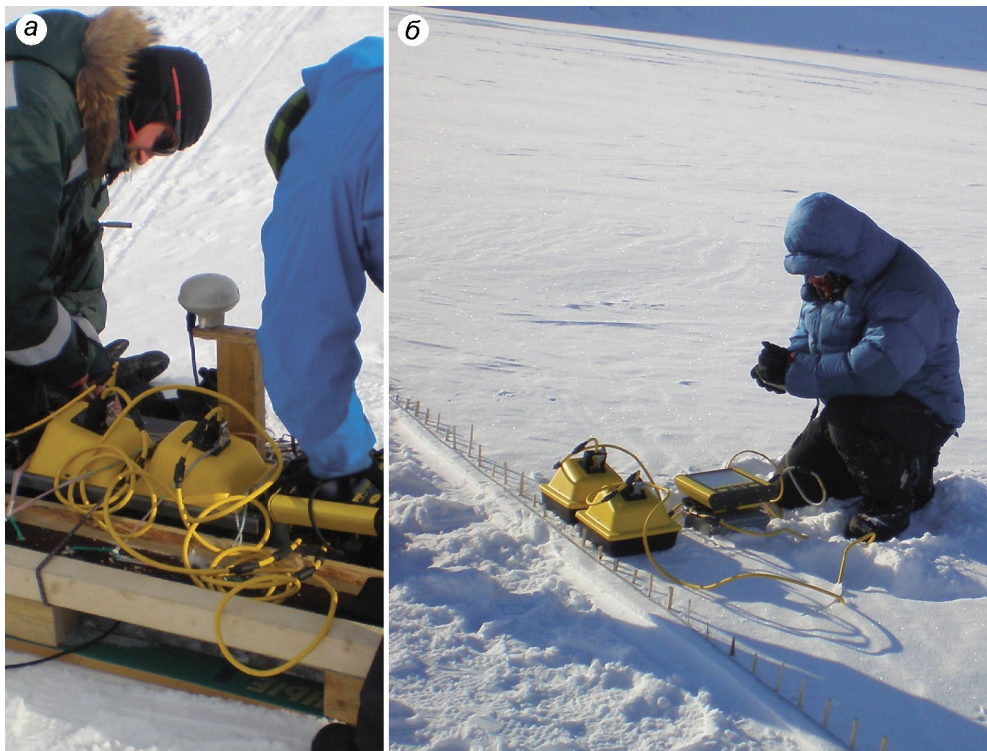


**Рис. 10.** Антенны типа «двойной квадрат» для 100 МГц локатора Института полярных исследований имени Скотта.

Применялись в 1997 г. для аэрозондирования ледников Северной Земли толщиной до 813 м на куполе Академии наук

**Fig. 10.** Antennas of «double square» type developed by E.V. Vasilenko for a 100 MHz radar of Scott Polar Research Institute.

They were used in 1997 for airborne RES of glaciers in Severnaya Zemlya with ice thickness up to 813 m at Academy Nauk ice cap



**Рис. 11.** Георадар pulseEKKO Pro с экранированными 500 МГц антеннами.

Применялся в 2014–2015 гг. для изучения толщины, слоистости и структуры снежного покрова на суше и ледниках Шпицбергена (а) и измерения скорости распространения радиоволн в снежном покрове (б) методом наклонного зондирования с общей глубинной точкой

**Fig. 11.** Georadar PulseEKKO Pro with 500 MHz shielded antennas.

It was used in 2014–2015 for study of thickness, layering and structure of snow cover on land (b) and glaciers (a) in Spitsbergen

гене, Земле Франца-Иосифа и Северной Земле установлены обширные участки ледниковых куполов и выводных ледников, ложе которых находится ниже уровня моря — именно они могут испытывать самые быстрые сокращения при по-

теплении климата из-за увеличения айсбергового стока и создавать угрозу для судов и морских буровых платформ в Баренцевом и Карском морях.

3. Значительная часть политермических ледников на Шпицбергене относится к классу пуль-



сирующих и имеет зимний внутриледниковый сток. Это позволяет рассматривать такие ледники как потенциально механически неустойчивые, предрасположенные к быстрым подвижкам (сёрджам), и как возможные источники зимнего водоснабжения.

4. Установлены заметные пространственно-временные вариации содержания воды в тёплом льду двухслойных (политермических) ледников Шпицбергена, которые могут влиять на их динамическое поведение.

К перспективным направлениям применения радиолокационных методов в гляциологии следует отнести: изучение толщины и структуры снежного покрова на суше и ледниках как важных регуляторов термической структуры подстилающих сред и важного элемента баланса массы ледников; определение стока льда из ледниковых куполов и выводных ледников в окружающие моря.

**Благодарности.** Эта работа поддержана грантом РФФИ 14-05-00022а. Авторы статьи благодарны всем сотрудникам, принимавшим участие в полевых исследованиях ледников, обработке и интерпретации полученных данных.

Результаты теоретических и полевых исследований по данной теме опубликованы в 176 статьях в отечественных и зарубежных изданиях. Основные ссылки на них можно найти в публикациях, перечисленных ниже.

**Acknowledgements.** This work was supported by Russian Foundation for Basic Researches (grant 14-05-00022a). Authors thank all collaborators who participated in field researches of the glaciers, in processing and interpretation of the data obtained.

Results of theoretical and field investigations obtained in framework of this theme are published in 176 papers in national and foreign publications. The main references are indicated in the list below.

*Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я.* Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС. 2014. 528 с.

*Котляков В.М.* (ред.) Гляциология Шпицбергена. М.: Наука, 1985. 200 с.

*Котляков В.М.* (ред.) Режим и эволюция полярных ледниковых покровов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 232 с.

*Котляков В.М.* (ред.) Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. 482 с.

*Котляков В.М.* (ред.) Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем. М.: Наука, 2007. 368 с.

*Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников / Ред. В.М. Котляков. М.: Научный мир, 2006. 392 с.

*Мачерет Ю.Я.* Метки на экране. М.: Медиа-Пресс, 2006. 216 с.

*Мачерет Ю.Я.* Гляциологи на ледниках. М.-СПб.: Нестор-История, 2015. 144 с.