

Геофизические и радиолокационные исследования Института географии АН СССР/РАН (1967-2015)

В 1967 году, в связи с началом работ по программе Международного десятилетия (МГД), в отделе гляциологии Института географии АН СССР была образована группа по изучению толщины и строения ледников с применением физических методов. Полевые исследования начались с гравиметрических и радиолокационных измерений на леднике Марух на Кавказе и были продолжены в 1968 году ледниках ИГАН и Обручева на Полярном Урале и леднике Гергети на Кавказе. В 1969 году гравиметрические измерения были выполнены на леднике Медвежий на Памире и в 1970-1971 годах – на ледниках Безенги, Колка и Майли на Кавказе (**рис. 1**).



Рис. 1. Гравиметрические измерения на леднике Колка, 1971 год.

На леднике Безенги были также выполнены сейсмические и наземные и воздушные (с вертолета) радиолокационные измерения.

В 1974-1975 и 1977-1979 и 1984 годах наземные и воздушные радиолокационные исследования были проведены на ледниках Шпицбергена и Северо-Восточной Земли, в 1981-1982 годах – в Заилийском и Джунгарском Алатау, в 1985, 1986 и 1990 годах – на Тянь-Шане (ледники Туяксу, Давыдова и Южный Иньльчек) и Памиро-Алае (ледник

Абрамова), в 2013-2014 годах – на ледниках Сары-Тор и Туяксу на Тянь-Шане и ледниках Безенги и Джанкуат и западном ледниковом плато Эльбруса на Кавказе.

В 1991/1992 году сотрудники Института географии АН СССР принимали участие в радиолокационных исследованиях на ледяном потоке В в Антарктиде, в 1991, 1994 и 1997 годах - в исследованиях ледников на Земле Франца-Иосифа и Северной Земле, в 1994 году – в Пиренеях, в 1995- 1998 годах – на островах Кинг-Джордж, Галиндес и Ливингстон в Антарктике, в 2000-2001 году – на Камчатке, в 1999-2000, 2003 и 2006 году – на острове Ливингстон.

В 1999, 2003-2007 и 2010-2015 годах исследования были продолжены на ледниках Шпицбергена, в 2005, 2007, 2008, в 2014-2015 годах – на ледниках Новой Земли, Земли Франца-Иосифа и Северной Земли и в 2011-2013 годах – на ледниках Кавказа.

Таким образом, в 1967-2015 годах экспедициями Института географии при поддержке и участии различных организаций наземные и воздушные радиолокационные исследования были выполнены в разных районах горного и полярного оледенения: на Полярном Урале, Кавказе, в Заилийском и Джунгарском Алатау, на Тянь-Шане, Памиро-Алае, Камчатке, в Пиренеях, в Арктике – на Шпицбергене, Новой Земле, Земле Франца-Иосифа и Северной Земле и в Антарктике – на островах Кинг-Джордж, Галиндес и Ливингстон. Эти исследования охватили более 300 ледников разных морфологических типов и размеров, относящихся к ледникам холодного, субполярного и теплого типов. На 28 ледниках – объектах гляциологических исследований по различным национальным и международным проектам и программам – были проведены детальные съемки толщины льда, а на 8 ледниках – радиофизические исследования, включавшие измерения скорости распространения радиоволн и амплитуды отраженных сигналов.

Эти исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) и проводились в сотрудничестве 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 Хоккайдо (Япония), институт Альфреда Вегенера (Германия), Институт геофизики Польской академии наук, Томский и Московский государственный университет, Марийский политехнический институт, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, институт вулканологии РАН, институт географии

Казахстана, Среднеазиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Узбекистан), и ЦАИЗ (Киргизия).

Аппаратура и методика радиолокационных исследований

До середины 1970-х годов для радиолокационных исследований ледников применялись серийные самолетные импульсные радиовысотомеры дециметрового диапазона – сначала с визуальной, а затем с аналоговой дискретной и/или непрерывной регистрацией радарных данных на фотопленке. Позднее, с учетом 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 в полярных и горных районах.

В 1967-1975 гг. для радиолокационных измерений с наземного и воздушного транспорта применялись самолетные радиовысотомеры РВ-10 и РВ-17 с рабочей частотой 440 МГц (**рис.2, 3**), имевшие ограниченную (до 200-300 м) глубину зондирования ледников.



Рис. 2. Антенны радиовысотомера РВ-10 на вездеходе. Полярный Урал, 1968 г.



Рис. 3. Измерения с радиовысотомером РВ-10 на леднике Безенги на Кавказе, 1970 год.

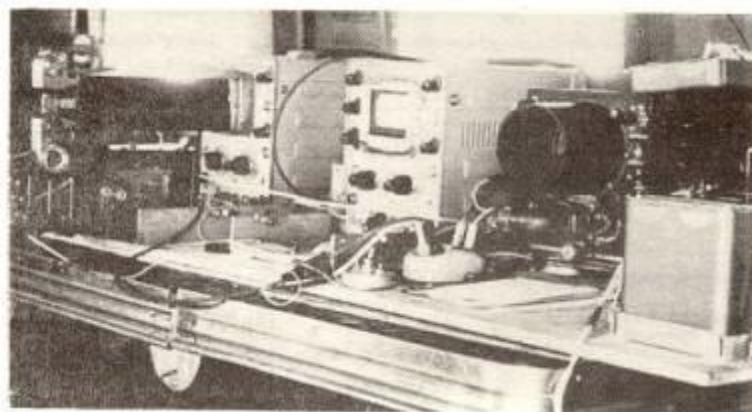


Рис. 4. Радиовысотомер РВ-10 на борту вертолета Ми-4, Шпицберген, 1974 год.

В 1979-1990 гг. для наземных измерений на ледниках Шпицбергена и Тянь-Шаня применялся локатор МПИ-8 с центральной частотой 1 МГц и 8 МГц (**рис. 5**).



Рис. 5. Измерения с локатором МПИ-8 на леднике Южный Иныльчек, 1990 год.

В 1977-1984 гг. для воздушных измерений применялся локатор РЛС-620 с рабочей частотой 620 МГц (рис. 6-8).



Рис. 6. Локатор РЛС-620 на борту вертолета Ми-8. Применялся в 1978- 1984 годах для аэроадиризондирования ледников Шпицбергена, Северо-Восточной Земли, Заилийского и Джунгарского Алатау и Земли Франца-Иосифа.

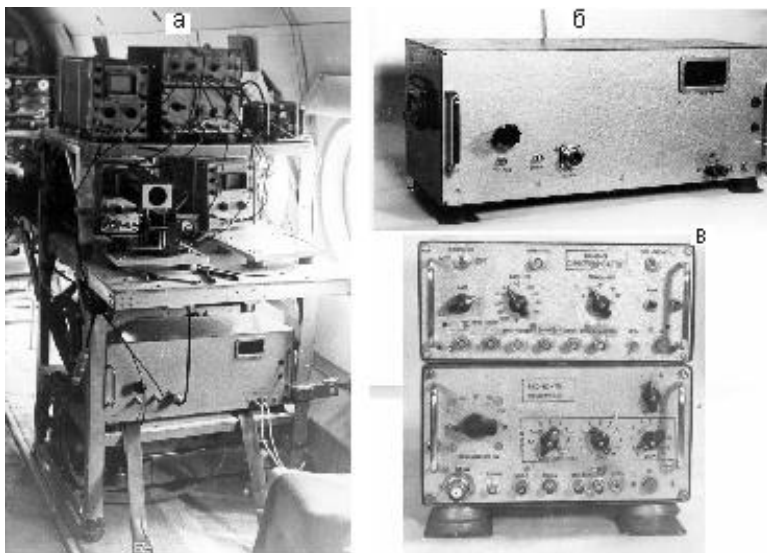


Рис. 7. Локатор РЛС-620 на борту вертолета Ми-8.



Рис. 8.16–элементная приемо-передающая антенна локатора РЛС-620, установленная под фюзеляжем вертолета Ми-8.

. Локаторы РЛС-620 и МПИ-8 и были разработаны в Марийском политехническом институте им. А.М. Горького (г. Йошкар-Ола) по договору и при участии Института географии АН СССР и имели глубину зондирования до 600 -1200 м.

В 1991 и 1994 годах для наземного зондирования ледников на Земле Франца-Иосифа и в Пиренеях применялся также локатор ТГУ с рабочей частотой 700 МГц и глубиной зондирования до 300 м, разработанный в Томском государственном университете (**рис. 9**).



Рис. 9. Измерения с локатором ТГУ на леднике Маладета в Пиренеях, 1994 год.

В 1997 году для аэрозондирования ледников Северной Земли толщиной до 800 м применялся 100 МГц локатор Института Полярных исследований Скотта с антеннами конструкции Е.В.Василенко (**рис. 10**).



Рис. 10. Антенны 100 МГц локатора на борту вертолета Ми-8, остров Средний Северная Земля. Локатор с такими антеннами применялся в 1997 году для аэрорадиозондирования ледников Северной Земли.

Для наземных измерений также применялся разработанный Е.В. Василенко видеоимпульсный радиолокатор ВИРЛ-1 с центральной частотой 40 МГц и глубиной зондирования до 330 м (**рис. 11**).



Рис. 11. Локатор ВИРЛ-1. Применялся в 1995-1988 годах для наземного зондирования ледниковых куполов на островах Кинг-Джордж и Галиндес в Антарктике.

До 1999 года регистрация отражений велась с экрана осциллографа на фотопленку в дискретном или непрерывном режиме, а привязка профилей и точек измерений осуществлялась геодезическим путем или визуально (во время полетов).

В 1999-2015 гг. для наземных измерений стали применяться разработанные Е.В. Василенко локаторы ВИРЛ-2, ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7 с центральной частотой 20 МГц,

снабженные системой цифровой регистрации радарных и навигационных GPS данных (рис.12, 13).



Рис. 12. Локатор ВИРЛ-2. Применялся в 1999 и 2000 годах для зондирования ледника Альдегонда на Шпицбергена и ледников Джонсонс Хард на острове Ливингстон.



Рис. 13. Локатор ВИРЛ-6. Применялся в 2000-2001 годах для зондирования ледника Кориго и ледникового купола Горшкова на вулкане Ушковский на Камчатке.



Рис.14. Локатор ВИРЛ-6. Применялся в 2003-2013 годах на Шпицбергене (ледники Ханс, ледниковое плато Амундсена на Земле Веделя Ярлсберга и 15 ледников на Земле Норденшельда (включая систему ледников Восточный Гренфьорд-Фритъоф) и на острове Ливингстон (ледники Джонсонс и Хард, ледниковое плато Боулес).



Рис. 15. Система цифровой регистрации радарных и навигационных GPS данных из комплекта локатора ВИРЛ-6.

Применение цифровой регистрации радарных и навигационных GPS данных позволило вместо фотопленок 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. Кроме того, применение более низких частот значительно уменьшило рассеяние радиоволн на неровностях поверхности и включениях воды в снежно-фирновой толще и позволило зондировать сильно трещиноватые и теплые

и политермические ледники толщиной до 600 м, на которых применение 440 МГц и 620 МГц локаторов не давало удовлетворительных результатов.

В 2011-2015 гг. для воздушных измерений применялись локаторы ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7, смонтированные на специальной ферме, подвешенной на тросе под фюзеляжем вертолета (рис. 16,17).



Рис. 16. локатор ВИРЛ-6 на вертолетной ферме. Применялся в 2012-2014 годах для аэрозондирования ледников Большого Кавказа и Эльбруса.



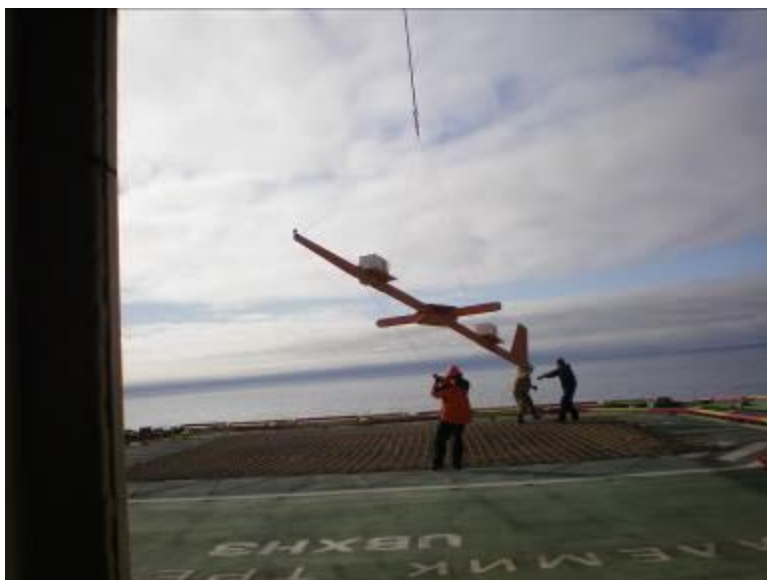


Рис. 17. Локатор ВИРЛ-6 на подвесной ферме под вертолетом Ка-32. Применялся в 2014 и 2015 годах для аэрозондирования ледников Новой Земли, Земли Франца-Иосифа и Северной Земли с борта научно-исследовательского судна «Академик Трешников» и атомного ледокола «Таймыр».

Это позволило измерить толщину выводных ледников, в том числе сильно трещиноватых, и оценить возможность образования ими крупных айсбергов, представляющих опасность для судоходства и морских платформ в бассейнах Баренцева и Карского морей.

В 2014 году, благодаря организации на Шпицбергене Российского научного центра (РНЦШ) появилась возможность для радиолокационных исследований толщины ледников и толщины и структуры снежного покрова на суше и ледниках использовать георадары Pulse Ekko с антеннами 500 МГц и 50 МГц (**рис.18-20**).



Рис. 18. Измерения толщины снежного покрова на Шпицбергене георадаром Pulse Ekko с антеннами 500 МГц, 2014-2015 годы.



Рис. 19. Измерения георадаром Pulse Ekko с антеннами 500 МГц методом наклонного радиозондирования скорости распространения радиоволн в снежном покрове на леднике Восточный Гренфьорд, 2014 год.



Рис. 20. Измерения толщины ледника Восточный Гренфьорд георадаром Pulse Ekko с антеннами 50 МГц. Шпицберген, 2014 год.

Основные результаты исследований

В результате выполненных исследований были получены новые данные о толщине, объеме, внутреннем строении и гидротермическом состоянии ~ 300 ледников, построены детальные карты толщины и подледного рельефа 40 ледников, оценены запасы льда на Шпицбергене и Земле Франца-Иосифа, Большом Кавказе и Эльбрусе, установлено распределение на Шпицбергене ледников с разным термическим режимом – холодным, теплым и политермическим.

Выполненные исследования показали следующее.

1. Для аэрозондирования с вертолета Ми-8 горных и субполярных ледников толщиной до 500–600 м весьма эффективным оказалось применение импульсного лоатора РЛС-620 дециметрового диапазона (620 МГц), снабженного приемо-передающей антенной с узкой (18°) диаграммой направленности и аналоговой системой регистрации. Для наземного зондирования холодных, субполярных, политермических и теплых ледников толщиной до 500 м особенно эффективным оказалась применение моноимпульсных радиолокаторов ВИРЛ-2, ВИРЛ-6 и ВИРЛ-7 декаметрового диапазона (центральная частота 20 МГц) с цифровой регистрацией радарной и навигационной информации. Эти лоаторы по своим характеристикам не уступают лучшим зарубежным аналогам, а по ряду характеристик превосходят их.
2. Получены новые сведения о толщине, подледном рельефе и внутреннем строении ледников в этих районах. В частности, установлено, что толщина ледников на Кавказе и Тянь-Шане может достигать 330 м (ледники Безенги, Южный Иньльчек), в районах горного, покровного и сетчатого оледенения на архипелаге Шпицберген – соответственно 300, 560 и 750 м, на ледниковых куполах Земли Франца-Иосифа, Северной Земли в Арктике – соответственно 450 и 813 м, а на островах Кинг-Джордж и Ливингстон в Антарктиде – соответственно 330 и 500 м. На архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля установлены обширные участки ледниковых куполов и выводных ледников, ложе которых находится ниже уровня моря – именно они могут испытывать самые быстрые сокращения при потеплении климата за счет увеличения айсбергового стока и создавать угрозу для судов и морских газонефтедобывающих платформ в Баренцевом и Карском морях.
3. Получены карты толщины льда и подледного рельефа ледников и ледниковых куполов – объектов гляциологических исследований по различным национальным и международным проектам и программам. К ним относятся: ледник Обручева на Полярном Урале, ледник Туюксу в Заилийском Алатау, ледник Абрамова на Памир-Алае, ледники Восточный Бреггер, Веринг, Богер, Бертиль, Альдегонда, Ханс, Восточный Гренфьорд и Фритьоф на архипелаге Шпицберген, ледник Кoryто и ледниковый купол Горшкова на Камчатке, ледниковые купола на островах Грэм-Белл, Галля, Ла-Ронсьер, Земля Вильчека на Земле Франца Иосифа и ледниковый купол Академии наук на Северной

Земле. Эти данные использованы также для оценки стока льда из выводных ледников, вытекающих из ледниковых куполов на Северной Земле.

4. По данным измерений толщины льда определен объем ряда исследованных ледников и ледниковых куполов. На этой основе получены корреляционные соотношения между их объемом и площадью и оценены современные запасы льда в горах Джунгарского Алатау, на архипелагах Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, а также их изменение на Земле Франца-Иосифа за 1953-1993 годы, составившее - 209 км³. Эта величина может служить ориентиром для оценки сокращения объема ледников Арктики в результате текущего потепления климата и их вклада в повышение уровня мирового океана. Изменение объема за 1936-1990 и 1979-2012 годы установлено также для ледников Альдегонда, Восточный Гренфьорд и Фритьоф на Шпицбергене.

5. Исследования на Полярном Урале и Кавказе впервые показали, что некоторые ледники могут состоять из слоев холодного и теплого льдов, т.е. относиться к особому классу двухслойных (политермических) ледников. Широкое распространение таких ледников установлено на архипелаге Шпицберген по данным аэрогазозондирования. Анализ этих данных показал, что значительная часть политермических ледников относится к классу пульсирующих и имеет зимний внутриледниковый сток. Эта особенность позволяет рассматривать такие ледники как потенциально механически-неустойчивые и как возможные источники зимнего водоснабжения (рис.21).

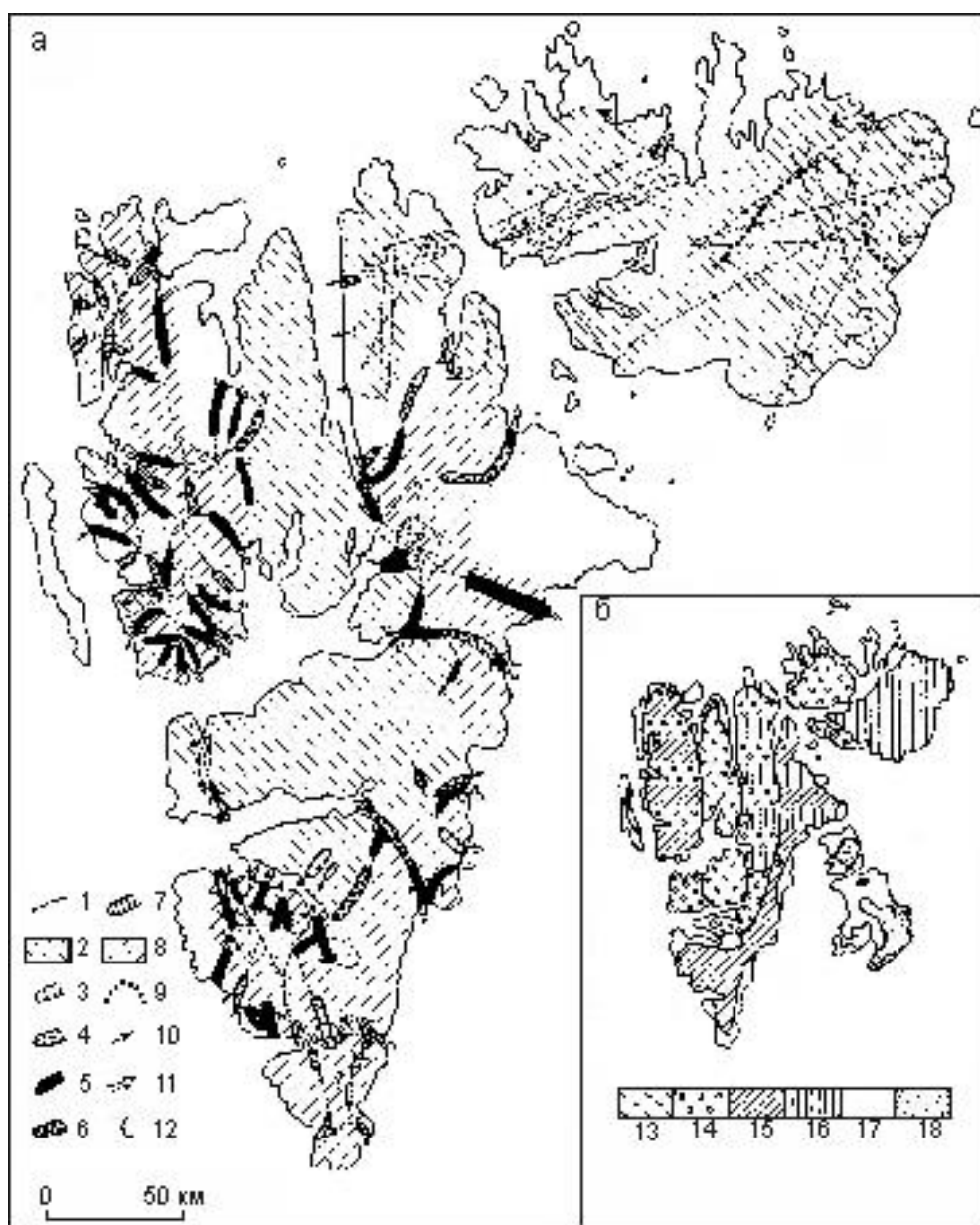


Рис. 21. Распределение холодных, теплых, политермических (двухслойных) ледников на архипелаге Шпицберген по данным аэрорадиозондирования на частоте 620 МГц. (а) Внутреннее строение и гидротермическое состояние: 1 – маршруты полетов; 2 – 8 – ледники их участки с разным гидротермическим состоянием: холодным – группа *A* (2); политермическим подгруппы *C1* (3), *C2* (4), *C3* (5), *D1* (6) и *D2* (7) и теплым – группа *E* (8), 9 – южная граница распространения ледников групп *C1* и *C2* на ледниковом куполе Аустфонна (Северо-Восточная Земля.; 10 – ледники с зимним внутриледниковым стоком и приледниковыми наледями (Гохман, 1987); 11 – ледники с известными подвижками (Корякин, 1985; Dowdeswell, 1984; Schytt, 1969); 12 – участки ледников с ложем ниже уровня моря. Косой штриховкой 2 и 8 показаны предполагаемые области с преобладающим распространением холодных и теплых масс льда. Из работ (Василенко, Мачерет, 1993; Мачерет и др., 1991, 1992).

6. Исследованы возможности применения радиолокационных методов для изучения радиофизических параметров ледников и подледного ложа, включая скорость распространения радиоволн и среднее содержание воды в ледниковой толще, интенсивность отражений от ложа и наличие воды на границе лед-ложе.

7. Впервые установлены заметные пространственно-временные вариации содержания воды в теплом льду двухслойных (политермических) ледников Шпицбергена, а также особенности распределения воды по глубине таких ледников (рис. 21, 22).

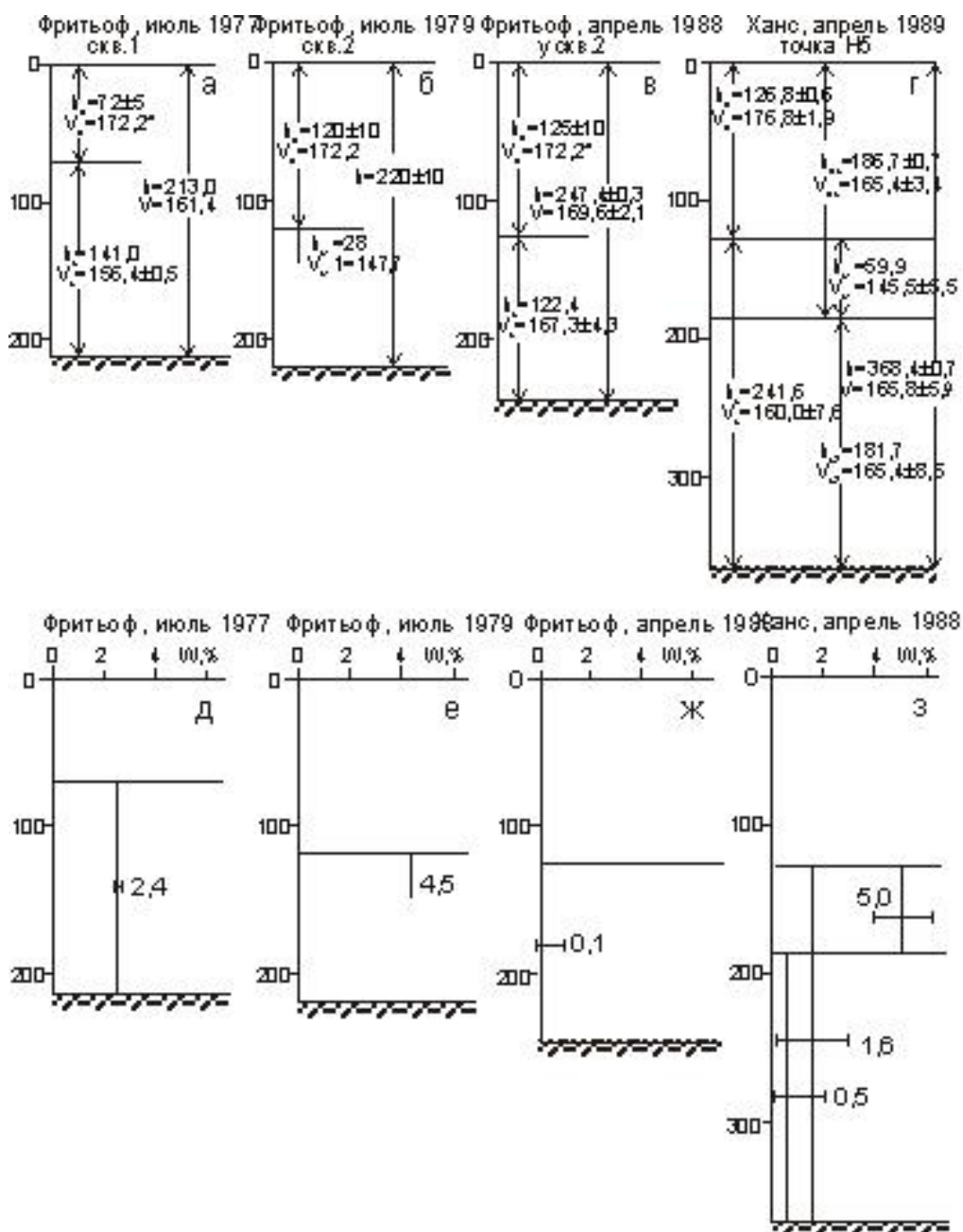


Рис. 21. Скорость распространения радиоволн в двухслойных ледниках Шпицбергена Фритьоф и Ханс (а-г) и оцененное по ней среднее содержание W воды в теплом льду этих ледников (д-з). Из работы (Macheret, Glazovsky, 2000).

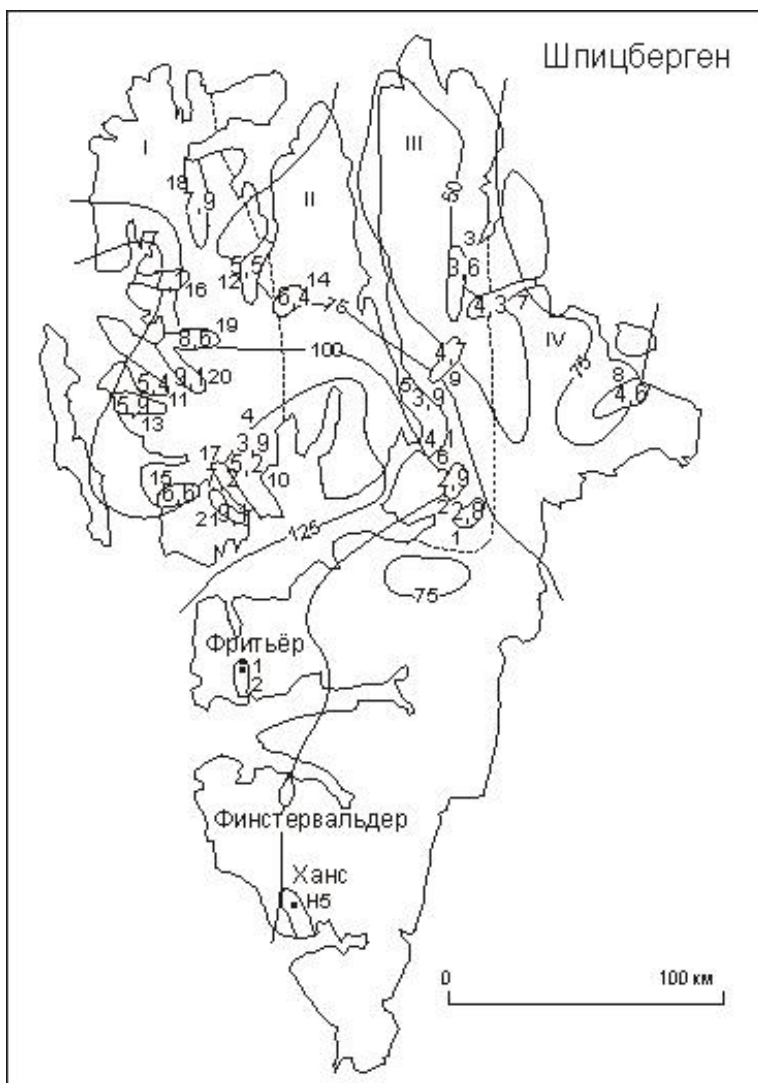


Рис.22. Среднее содержание воды в верхней части теплого льда двухслойных ледников Шпицбергена по данным измерений коэффициента отражения от границы раздела холодного и теплого льда. Римскими цифрами обозначены районы Шпицбергена с разными условиями питания ледников, изолиниями – величины таяния на высоте границы питания ледников (Корякин и др., 1985). Из работы (Macheret, Glazovsky, 2000).

Выполненные исследования послужили толчком к выяснению механизмов возникновения двухслойных (политермических) ледников, формирования их гидротермической структуры и к изучению гидротермической структуры таких ледников как индикаторов изменений регионального климата.

К перспективным направлениям применения радиолокационных методов в гляциологии следует отнести:

(1) изучение баланса массы ледников в комплексе с керновым бурением неглубоких и глубоких скважин, поскольку данные радиозондирования могут

обеспечить определение глубины внутренних реперных отражающих слоев в снежно-фирновой и ледниковой толще, а исследования керн – их датировку.

(2) измерение толщины и структуры снежного покрова как важного регулятора термической структуры ледников и важного элемента их баланса массы;

(3) определение стока льда из ледниковых куполов и выводных ледников в окружающие моря с использованием данных радиозондирования по толщине льда и спутниковых изображений, пригодных для определения поверхностной скорости движения льда.

(4) Изучение толщины и структуры снежного покрова на суше и ледниках.