

## ТОЛЩИНА ЛЬДА И АЙСБЕРГОВЫЙ СТОК ВЫВОДНЫХ ЛЕДНИКОВ НОВОЙ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Лаврентьев И.И.<sup>1</sup>, Глазовский А.Ф.<sup>1</sup>, Сальман А.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия, e-mail: lavrentiev@igras.ru*

<sup>2</sup>*ООО «ЭС-ПАС» Москва, Россия, e-mail: a.salman@es-pas.com*

### Реферат

Данные о толщине льда, полученные в результате воздушной радиолокационной съёмки 3 выходных ледников на архипелаге Новая Земля на частоте 20 МГц, данные о скоростях движения и высоте поверхности ледников были использованы для оценки потоков льда на фронтах, фронтальной абляции и потенциальной айсберговой продуктивности ледников. Площадь потенциальной зоны отёла (области ледника, где рельеф ложа ниже уровня моря) достигает 87,4 км<sup>2</sup> на леднике Вершинского, 54,3 км<sup>2</sup> на леднике Розе и 44,6 км<sup>2</sup> на леднике Рождественского. Учитывая размеры тех фронтальных частей ледников Розе и Вершинского, которые близки к всплыванию, максимальные горизонтальные размеры потенциальных айсбергов могут достигать 50–500 м при толщине 60–130 м. Средняя толщина льда на фронтах исследованных ледников составляет 95 метров. Максимальная скорость движения льда во фронтальной части ледника Вершинского достигает 350–390 м/год. Скорость айсбергового стока трёх изученных ледников за 2015–2016 гг. оценивается в 0,48 км<sup>3</sup>/год.

**Ключевые слова:** воздушная радиолокация, выводной ледник, толщина льда, Новая Земля, айсберговый сток.

## ICE THICKNESS AND FRONTAL ABLATION OF OUTLET GLACIERS ON NOVAYA ZEMLYA FROM RADIO-ECHO SOUNDING DATA

Lavrentiev I.I.<sup>1</sup>, Glazovsky A.F.<sup>1</sup>, Salman A.L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia, e-mail: lavrentiev@igras.ru*

<sup>2</sup>*ES-PAS, LLC, Moscow, Russia, e-mail: a.salman@es-pas.com*

### Abstract

Ice thickness data derived from 20 MHz airborne RES survey of 3 outlet glaciers on Novaya Zemlya archipelago, data on glacier surface velocities and ice surface elevation were used to estimate the ice discharge across the fluxgates at glacier termini, the frontal ablation, and potential calving productivity. Area of potential calving zone (part of glacier area with bedrock topography below sea level) reaches 87,4 km<sup>2</sup> on Verzhinsky, 54,3 km<sup>2</sup> on Roze and 44,6 km<sup>2</sup> on Rozhdestvensky glacier. Considering the size of those terminus parts of Roze and Verzhinsky glaciers that are close to flotation, the maximum horizontal dimensions of potential icebergs could reach 50–500 m and 60–130 m thick. Average ice thickness registered at glacier fronts is 95 m. Maximum ice flow velocity at the front of Verzhinsky Glacier reaches 350–390 m a<sup>-1</sup>. Frontal ablation rate of three studied glaciers is assessed as 0,48 km<sup>3</sup> a<sup>-1</sup> for 2015–2016.

**Keywords:** airborne radio-echo sounding, outlet glacier, ice thickness, Novaya Zemlya, frontal ablation.

## Введение

Знание фронтальной абляции, или айсбергового стока приливных ледников Новой Земли весьма ограничены, хотя эта важнейшая составляющая баланса их массы должна учитываться при оценке айсберговой опасности при освоении акваторий арктического и субарктического шельфа. Айсберги представляют значительную опасность для любых морских операций: судоходства, коммерческого рыболовства, проведения геологоразведочных работ и добычи углеводородов с морских надводных сооружений. Повреждение или разрушение айсбергом стационарной платформы и ее коммуникаций, например, приведет к огромным экономическим убыткам, возможен значительный урон окружающей среде и другие последствия.

## Данные и методы

Область нашего интереса – Карская сторона архипелага Новая Земля, где недавно радиолокационным методом были исследованы 3 крупных выводных ледника – Розе, Рождественского и Вершинского (рис. 1). Данные о толщине льда были получены в 2014–2016 гг. в ходе воздушной радиолокационной съёмки в рамках трёх морских экспедиций ААНИИ и «НК Роснефть». Для радиолокационного зондирования применялся импульсный радар ВИРЛ-7 с центральной частотой 20 МГц [Vasilenko et al., 2011]. Компоненты радиолокатора – блок управления, приёмо-регистрирующие устройства, антенны и GPS-приёмник были смонтированы на специальной деревянной ферме с хвостовым стабилизатором, которая подвешивалась под фюзеляжем вертолёта на неметаллическом тросе (рис. 2). Маршруты полетов над ледниками, оканчивающимися в море и продуцирующих айсберги, выбирались как вдоль фронтов ледников, так с их пересечением, чтобы получить данные об их толщине на максимально возможной площади. Высота полета относительно физической поверхностью ледника – в зависимости от его геометрии и погодных условий – составляла 100–400 м, скорость полета – 100–120 км/ч.

Поверхностные скорости движения ледников были получены по данным анализа повторных космических снимков Landsat-8 и набора данных GoLIVE v. 1 за 2014–2016 гг., повторных изображений со спутникового радиолокатора с синтетической апертурой TerraSAR за 2017–2018 гг. и непрерывных двухгодичных записей с GPS-буёв ARGOS, установленных на этих ледниках [Сочнев и др., 2018]. Данные ArcticDEM о высоте ледниковой поверхности ледников в сочетании с данными о толщине льда использовались для составления карт рельефа подлёдного ложа ледников.

Собранная информация использовалась для оценки потоков льда через поперечные сечения у концов ледников, фронтальной абляции и потенциального айсбергового стока. Данные о поверхностной скорости движения льда, полученные различными методами из разных источников, хорошо согласуются и даже показывают слабовыраженную сезонность хода на ледниках Розе и Рождественского, а на леднике Вершинского сезонная картина скорости движения льда наиболее выражена.

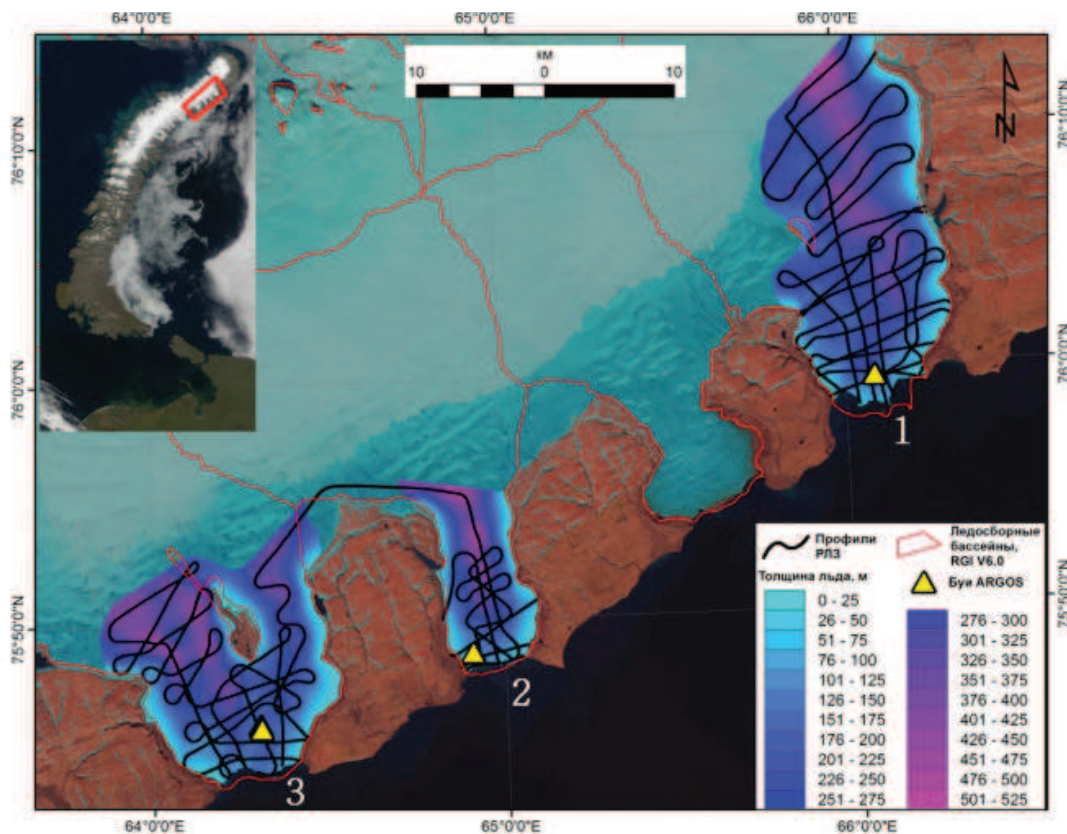


Рис. 1. Профили радиолокационного зондирования и толщина ледников на Карской (восточной) стороне Новой Земли.  
 Цифрами отмечены ледники: 1 – Розе; 2 – Рождественского; 3 – Вершинского.  
 В основании – космический снимок Landsat 8 от 30.08.2017 г.

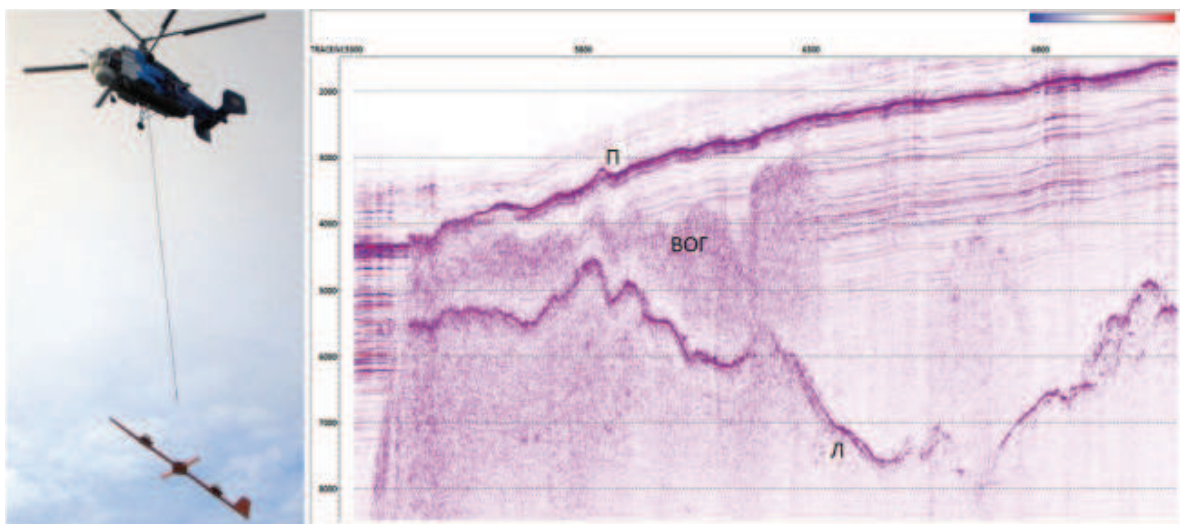


Рис. 2. Ферма с закреплённым на ней радиолокационным оборудованием, транспортируемая вертолётном (а) и пример радарограммы, полученной на леднике Вершинского в 2015 г (б).

По горизонтали отложены трассы, по вертикали – время запаздывания сигналов, нс.  
 П – отражение от поверхности ледника; ВОГ – отражения от внутренних отражающих горизонтов;  
 Л – отражение от подлёдного ложа ледника

## Результаты

Средняя и максимальная толщина льда исследованных ледников составляет, соответственно, 208 и 526 м (см. табл. 1), а подледное ложе опускается на 180 м ниже уровня моря. Средняя толщина льда на фронтах составляет 95 метров. Среднегодовая скорость движения ледников варьирует от 54 (Розе) до 200 (Вершинского) м/год. А самым быстродвижущимся ледником из трёх изученных является ледник Вершинского, максимальная скорость движения льда в его фронтальной части достигает 350–390 м/год.

Таблица 1

Параметры исследованных ледников восточного побережья Новой Земли

Параметр ледника/ед. измерения	Розе	Рождественского	Вершинского
Площадь ледника По каталогу RGI / исследованной области	600/291	583/88,5	657/253
Толщина льда исследованной части Средняя / Максимальная, м	238/526	168/408	220/501
Объём льда исследованной части, км <sup>3</sup>	69,5	14,9	51,8
Среднегодовая скорость течения льда, м/день	0,148	0,165	0,553
Среднегодовой поток льда на фронте, км <sup>3</sup> /год	0,040	0,013	0,124
Изменение площади, км <sup>2</sup> /год	-0,59	-0,24	-0,46
Средняя толщина льда на фронте, м	119	63	104
Расход льда на фронте ледника, км <sup>3</sup> /год	0,077	0,041	0,172
Площадь ложа ниже уровня моря, км <sup>2</sup>	54,3	44,6	87,4
Сколько еще лет будет продуцировать айсберги, лет	250	240	214

Непрерывные двухгодичные данные измерений скорости течения ледников позволили выделить два основных сезона с относительно высокими и низкими скоростями. В тёплый период года (июнь-август) скорости движения выше, чем в холодный период (сентябрь-май) в среднем на 25–30 %. Тем не менее, поток льда, поступающий к фронту ледников в холодный период больше, чем в теплый в 1,8–2,2 раза ввиду большей его продолжительности.

В целом за год потоки льда, поступающие к фронтам изученных ледников, составляют от 0,01 до 0,12 км<sup>3</sup>/год. При стационарном положении фронтов, эти потоки соответствуют расходам льда ледников

в море. Они включают в себя расход на айсберги, над- и подводное таяние фронтальной стенки, осыпание фронта. Из-за сокращения площади ледников в их фронтальных частях, происходят дополнительные потери льда в море, которые составляют от 30 до 70 % от общих потерь льда в море, тем самым являясь важным компонентом в формировании айсбергового стока.

Площадь потенциальной зоны отёла (области ледника, где рельеф ложа ниже уровня моря) достигает 87,4 км<sup>2</sup> на леднике Вершинского, 54,3 км<sup>2</sup> на леднике Розе и 44,6 км<sup>2</sup> на леднике Рождественского. Учитывая размеры тех фронтальных частей ледников Розе и Вершинского, которые близки к всплыванию, максимальные горизонтальные размеры потенциальных айсбергов могут достигать 50–500 м при толщине 60–130 м.

Данные радиолокационной съёмки показывают, что исследованные ледники обладают большим потенциалом айсбергообразования, а именно при современных темпах отступления их фронтов, отёл ледников будет продолжаться ещё не менее 200 лет. При этом, интенсивность образования айсбергов, их плановые размеры и осадка могут даже увеличиваться в зонах с большими глубинами подледниковых долин. Скорость фронтальной абляции трех изученных ледников за 2015–2016 гг. оценивается в 0,48 км<sup>3</sup>/год.

### Благодарности

*Работа подготовлена в рамках Государственного задания №0148-2019-0004, аналитические работы проводились в рамках гранта РФФИ №18-05-60109.*

### Литература

Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Тарасов П.А., Сальман А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Ефимов Я.О., Мамедов Т.Э. Исследование ледников Российской Арктики для обеспечения айсберговой безопасности работ на шельфе // Нефтяное хозяйство, (10): 92–97, 2018.

Vasilenko, E.V., Machio, F., Lapazaran, J.J., Navarro, F.J., Frolovskiy, K. (2011) A compact lightweight multipurpose ground-penetrating radar for glaciological applications // J. Glaciol., 57(206). – P. 1113–1118, doi:10.3189/002214311798843430.