

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.6

doi: 10.31857/S2076673420010019

## Колебания ледников Северного и Южного ледниковых полей Патагонии по данным мониторинга с Международной космической станции

© 2020 г. В.М. Котляков<sup>1\*</sup>, Л.В. Десинов<sup>1</sup>, С.Л. Десинов<sup>1</sup>, Е.О. Серова<sup>2</sup>, И.Л. Ивонин<sup>1</sup>,  
Е.Д. Крючкова<sup>3</sup>, Е.А. Новикова<sup>3</sup>, В.А. Рудаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Ракетно-космическая корпорация «Энергия», г. Королев, Московская область, Россия; <sup>3</sup>МГИМО МИД РФ, Москва, Россия  
\*vladkot6@gmail.com

## Glacier fluctuations in the Northern and Southern Patagonian Ice Fields retrieved from observations on the International Space Station

V.M. Kotlyakov<sup>1\*</sup>, L.V. Desinov<sup>1</sup>, S.L. Desinov<sup>1</sup>, E.O. Serova<sup>2</sup>, I.L. Ivonin<sup>1</sup>, E.D. Kryuchkova<sup>3</sup>,  
E.A. Novikova<sup>3</sup>, V.F. Rudakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <sup>2</sup>Rocket and Space Public Corporation «Energiya», Korolev, Moscow Region, Russia; <sup>3</sup>Moscow State Institute of International Relations, Ministry of Foreign Affairs of Russia, Moscow, Russia  
\*vladkot6@gmail.com

Received June 7, 2019 / Revised August 7, 2019 / Accepted September 19, 2019

**Keywords:** *climate change, glacier degradation, glacier tongue, ice fields, International Space Station, space image, Patagonia.*

### Summary

Quantitative indicators of changes in 37 glaciers of the Patagonian Northern and Southern glacial fields were determined by means of decoding and analysis of photographs obtained by astronauts from the Russian segment of the International Space Station. On the basis of this information it was concluded that in 2002–2016 the glaciers of both fields of Patagonia continued to retreat. The frontal parts of the nine glaciers retained their positions, while others reduced at an average rate of several dozen up to 430 m/year. Repeated monitoring of 16 glaciers from this selection and analysis of the data obtained in 2016–2019 confirm this conclusion. The only exception was the O'Higgins Glacier, which did not change position of its frontal part for 12 years and then retreated in 2018–2019 to 1,250 m. In some cases, a gradual decrease in area of the frontal part of the glacier was accompanied by a sharp collapse of the lower zone with the formation of extensive fields of icebergs. The dynamics of the Bruggen Glacier (Pius XI) are not typical for the region under consideration: for many years this glacier has been advancing. This development cannot be explained without detailed field investigation in the area of snow and ice accumulation of the glacier. Perhaps that was due to a snow-drift transport in an extensive area of accumulation that supported the preservation of the size of the glacier tongue, and even its advance. According to our observations, the average rate of retreat of the glaciers of the Western and Eastern slopes of the Southern Ice Field significantly decreased since 2010, i.e. their degradation slowed down. At the same time, glaciers of the Northern Ice Field continued to decrease intensively.

**Citation:** Kotlyakov V.M., Desinov L.V., Desinov S.L., Serova E.O., Ivonin I.L., Kryuchkova E.D., Novikova E.A., Rudakov V.F. Glacier fluctuations in the Northern and Southern Patagonian Ice Fields retrieved from observations on the International Space Station. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 60 (1): 5–18. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010019.

Поступила 7 июня 2019 г. / После доработки 7 августа 2019 г. / Принята к печати 19 сентября 2019 г.

**Ключевые слова:** *изменение климата, космический снимок, ледниковые поля, Международная космическая станция (МКС), отступление ледников, Патагония, язык ледника.*

В результате анализа фотоснимков с Международной космической станции определены изменения 37 ледников Северного и Южного ледниковых полей Патагонии. В 2002–2016 гг. ледники обоих полей продолжали отступать, но их отступление с 2010 г. замедлилось, хотя некоторые ледники Северного ледникового поля продолжают интенсивно сокращаться. Лишь ледник Брюгген (Пия XI) на Южном ледниковом поле в течение многих лет наступает.

## Введение

С 2001 г. с российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) выполняется фотосъёмка земной поверхности (программа «Ураган»). До 2010 г. разрешение на местности снимков достигало 5 м, но в последние годы с доставкой на борт РС МКС фотокамеры с матрицей 36 мегапикселей и объектива с фокусным расстоянием 1600 мм детальность съёмки возросла до 2–3 м. Этот параметр не постоянен. Он зависит от качества объективов, величины диафрагмы при съёмке и прочих факторов. Фотоснимки земной поверхности, сделанные с борта РС МКС с высоты 380–400 км, входят в разряд данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения. За 19 лет получено около 2000 снимков ледников Патагонии с разрешением на местности от 2 до 5 м. Особенно плодотворной стала работа на борту МКС соавтора этой статьи Е.О. Серовой, которая в летнее время года – для Южного полушария с ноября 2014 по март 2015 г. – более 950 раз фотографировала ледники этой территории. Получить такой массив информации удалось благодаря включению мониторинга этих ледников в задания первого приоритета и ежедневному дежурству космонавта у иллюминаторов станции на тех трёх суточных витках, когда МКС пролетает над Южными Андами. По статистике, эта территория более 70% времени года закрыта облачностью [1].

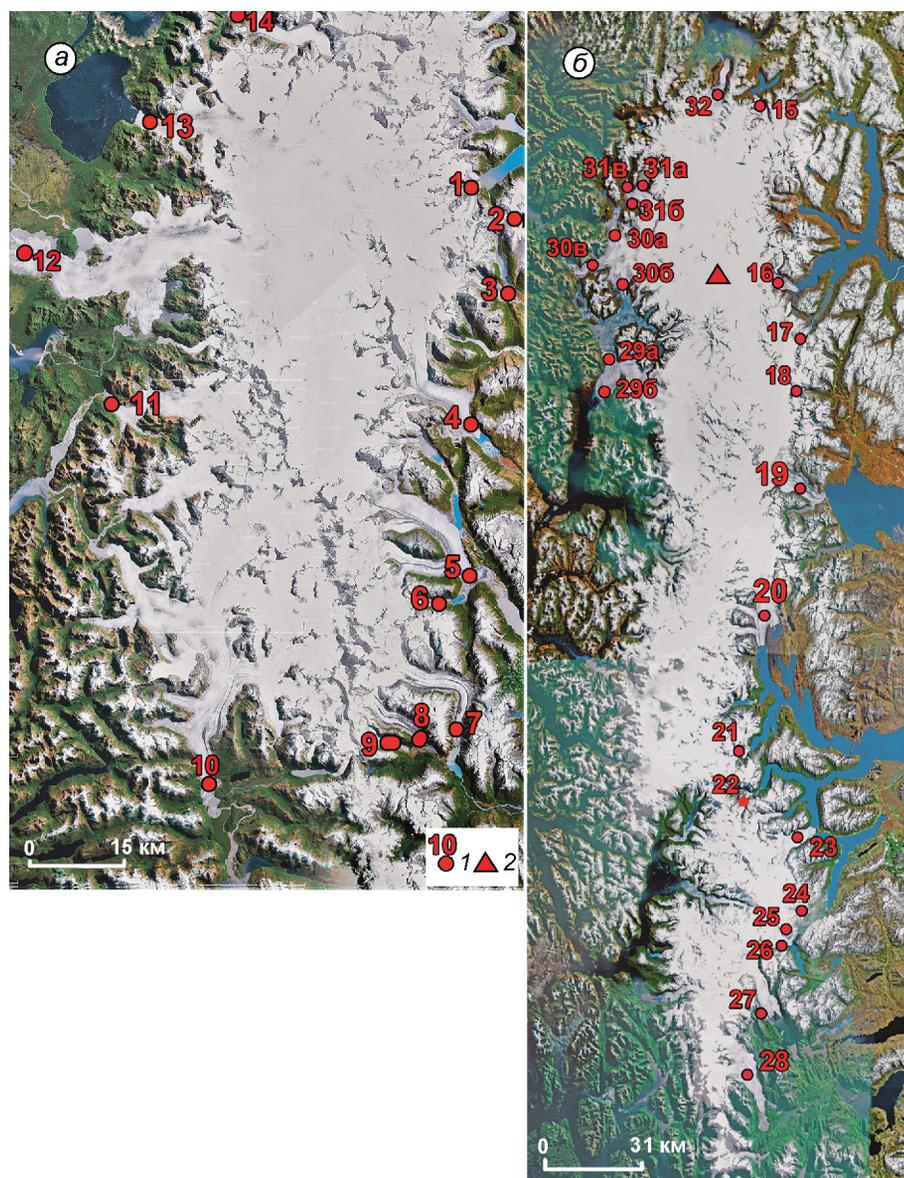
Гребни хребтов задерживают приходящие с Тихого океана воздушные потоки, содержащие большое количество влаги. Из этих воздушных масс, охлаждающихся в высотном поясе гор, в области аккумуляции ледников выпадают обильные осадки в виде снега. В периоды потепления, которые были отмечены метеорологическими службами Чили и Аргентины во второй половине XX и начале XXI в., западные склоны получали достаточно влаги для поддержания баланса массы ледников, тогда как на восточных склонах Анд количество осадков уменьшилось [1] и питание ледников сократилось.

Первые работы по измерению перемещения фронтальных участков ледников по данным одиночных мелкомасштабных фотоснимков выполнены в середине 1960-х годов [2]. С начала 1970-х годов гляциологи Института географии РАН измеряют перемещения фронтальных участков

ледников по данным космической фотосъёмки. Первые 25 лет исходным материалом для изучения динамики ледников служили снимки, получаемые с автоматических космических аппаратов серий «Зенит» и «Ресурс–Ф», оснащённых топографической камерой СА-20 (более известной как КФА-1000) [3]. Эта аппаратура с высоты около 220 км обеспечивала получение информации о фрагменте земной поверхности площадью  $70 \times 70$  км с разрешением на местности около 5 м. Отклонение оптической оси фотоаппаратов от вертикали не превышало  $7^\circ$ , что позволяло трансформировать снимки аналитическим способом.

По данным съёмки 1975–1976 гг. были обнаружены и изучены признаки активизации памирских ледников Шокальского, Ванчдара и № 88, которые вскоре подтвердились их выразительными подвижками [4]. В октябре 1977 г. в Советском Союзе началась реализация программы визуально-инструментальных исследований на орбитальных пилотируемых станциях серии «Салют», одной из главных направлений которой стали исследования динамики ледников Памира, Тянь-Шаня, Каракорума и Патагонии. Уже первые сеансы фотосъёмки, выполненные ручной камерой «Пентакон-6М» на цветную плёнку с разрешением на местности около 30 м [5], принесли важную информацию о ледниках обоих ледниковых полей Патагонии, в частности, об очередном перекрытии ледником Морено канала Темпанос на оз. Аргентино, об отторжении от ледника О'Хиггинс айсберга площадью около  $12 \text{ км}^2$  и о положительной динамике крупнейшего ледника Южной Америки – Брюгген. Такие работы в 1970–80-х годах были ещё эпизодическими, но с появлением в 1990-х годах ГИС пользовательского уровня ситуация резко улучшилась. Однако после 1999 г. в российской космической программе ДЗЗ последовала затяжная пауза, когда орбитальная фотосъёмка земной поверхности проводилась только космонавтами, а спутники не использовали.

В 2006 г. на орбиту был выведен ИСЗ «Ресурс-ДК», обеспечивавший детальность цифровой съёмки 2 м. В 2019 г. в российской космической программе задействованы только две системы ДЗЗ, аппаратура которых обеспечивает разрешение на местности 1–2 м. В отечественной науке работы по систематическому мониторингу колебаний концов ледников и изучению пульсирующих ледников по данным космической фото-



**Рис. 1.** Северное (а) и Южное (б) ледниковые поля Патагонии.

1 – точками отмечено положение ледников, объектов мониторинга с российского сегмента МКС; 2 – вулкан Лаутаро

**Fig. 1.** Northern (a) and Southern (b) Patagonian Ice Fields.

1 – points show the position of glaciers, subjects of monitoring from Russian Segment of the International Space Station; 2 – volcano Lautaro

съемки начаты летом 1974 г. и результаты их были опубликованы в 1977 г. [3, 4]. Эти исследования касались наблюдений за ледниками Памира. В последующие годы, особенно с начала XXI в., наблюдения с МКС за ледниками Патагонии были продолжены. В настоящей статье рассмотрены материалы, полученные за последние 20 лет.

### Район исследований

Ледниковые поля Патагонии – обширный очаг современного оледенения, не сопоставимый по своим масштабам с запасами льда в других горных районах средних широт. В ледниках

Северного и Южного полей Патагонии на площади около 21 000 км<sup>2</sup> сосредоточено около 12% всего внеполярного оледенения нашей планеты. Эти запасы льда неравномерно распределены между двумя горными плато. Первое из них имеет длину около 120 км и ширину 50 км. Второе раскинулось на площади около 13 500 км<sup>2</sup> вдоль меридианов 73° и 74° з.д. на протяжении 330 км (рис. 1). Для оценки основных особенностей динамики оледенения Патагонии мы выбрали 14 ледников Северного поля и 23 ледника Южного поля (см. рис. 1 и таблицу).

Область исследования находится в зоне влияния воздушных масс Атлантического и Тихого океанов. На западной стороне гор выпадает

## Динамика ледников Северного и Южного ледниковых полей Пагагонии в 2002–2016 гг., м\*

№ п/п	Ледники ю.ш.; з.д.	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Отступление, м всего** за год	
		<i>Ледники восточной экспозиции Северного ледникового поля</i>																
1	Леонас Leonas 46,76°; 73,22°					120					+70	10	+40	30	10	60	120	17
2	Ледник 46,83°; 73,12°											100					100	25
3	Солер Soler 46,91°; 73,15°						0										0	0
4	Нэф Nef 47, 08°; 73, 25°			0	0		400	+110	+270	430				210		190	850	65
5	Колония Colonia 47,25°; 73,21°			20	20		60	+230	170	+200	700	300	+110	200		910	910	70
6	Ледник 47,29°; 73,30°						0							0			0	0
7	Паред, северный поток языка Pared, North part of tongue 47,46°; 73,25°			220			10	0	90	270			150			380	1120	80
8	Паред, южный поток языка Pared, South part of tongue 47,46°; 73,32°							0				0				0	0	0
9	Пискис Piscis 47,46°; 73,37°						470										470	47
<i>Ледники западной экспозиции Северного ледникового поля</i>																		
10	Стеффен Steffen 47,52°; 73,71°						+140		1560	+400	540		510		+300	1770	197	
11	Бенито Benito 47,03°; 73,89°								700	160	200		480		250	1790	300	
12	Сан-Куинтин San-Quintin 46,85°; 74,06°								0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	Сан-Рафаэль San-Rafael 46,68°; 73,84°								100							100	33	
14	Гуалас Gualas 46,49°; 73,65°									140						140	70	
<i>Ледники восточной экспозиции Южного ледникового поля</i>																		
15	Бергуэз Berguez 48,35°; 73,30°					430						320					750	58
16	О'Хиггинс O'Higgins 48,92°; 73,13°							0									0	0
17	Чико Chico 49,00°; 73,04°					230			230				170				630	53
18	Маркони Marconi 49,21°; 73,09°							0									0	0
19	Вьедма Viedma 49,52°; 73,01°			500	130	160	20	160	100	0	190	270	20	150	630	2330	166	
20	Упсала Upsala 49,91°; 73,28°			300		290	440	810	310	850	430	270	370		0	4070	290	
21	Спегазинни Spegazzinni 50,24°; 73,33°							0									0	0
22	Майо Mayo 50,36°; 73,33°							0									0	0
23	Перито Морено Perito Moreno 50,46°; 73,05°							0									0	0
24	Фриас Frias 50,73°; 73,10°							65				160			25	250	28	
25	Синкуэнтенарио Cincuentenario 50,75°; 73,15°							160				510			40	790	90	
26	Диксон Dickson 50,78°; 73,15°							90				430			100	620	69	
27	Грей Grey 50,98°; 73,21°					560				540			320			1420	101	
28	Тиндалл Tyn dall 51,25°; 73,28°			370			150		490			430		60		1500	107	

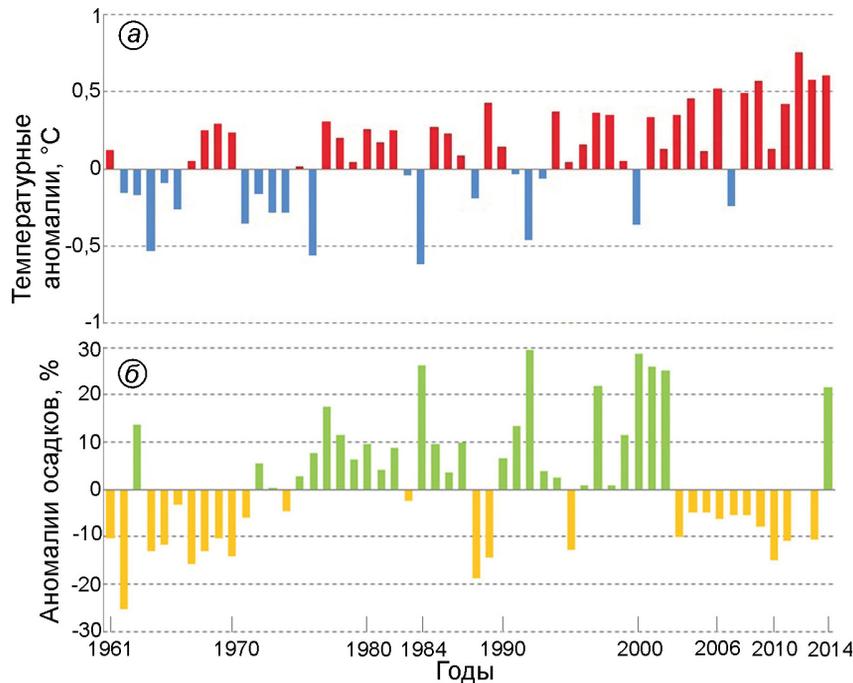
Ледники западной экспозиции Южного ледникового поля									
29а	Брюгген (Пия XI), северный поток языка Pio XI (Bruggen), North part of tongue 49,09°; 73,97°	+260	+240	+390	+460	+1350	+112		
29б	Брюгген (Пия XI), южный поток языка Pio XI (Bruggen), South part of tongue 49,23°; 74,01°	+780	+180	+450	+440	+1850	+154		
30а	Греве, северный поток языка Greve, North part of tongue 48,69°; 73,93°;	1050	0	50		1100	110		
30б	Греве, южный поток языка Greve, South part of tongue 48,94°; 73,94°;	1650	1090	1140		3880	431		
30в	Греве, западный поток языка Greve, West part of tongue 48,85°; 74,12°	1100	1230	1670		4000	333		
31а	Бернардо, северный поток языка Bernardo, North part of tongue 48,62°; 73,82°	300	200	1050		1550	129		
31б	Бернардо, южный поток языка Bernardo, South part of tongue 48,66°; 73,87°	530	390	220		1140	95		
31в	Бернардо, западный поток языка Bernardo, West part of tongue 48,61°; 73,89°	1430	0	30		1460	121		
32	Джорже Монтт Jorge Montt 48,32°; 73,46°		1810	1830		3760	342		

\*Знаком + обозначено приращение длины языков ледников. \*\*Суммарное перемещение фронтальной части ледников в среднем за все годы наших наблюдений. Нули в таблице говорят о том, что положение фронта у ряда ледников за указанный период времени оставалось неизменным, хотя год от года оно и испытывало небольшие изменения, а фронтальные части восьми ледников за все годы наблюдений так и остались неизменными. Пустые графы (с отсутствием цифр и нулей) означают отсутствие данных за указанные годы.

около 4000 мм осадков в год, а в самом верхнем поясе — до 7500 мм [6]. На восточном склоне ледниковых полей атмосферное питание заметно меньше, а летом до самых верховий ледников нередко идут дожди. Важнейшие метеорологические параметры этого региона — обильные осадки и частый сильный западный ветер. В работе [1] приведены дни, когда Северное ледниковое поле было полностью или частично покрыто облаками, а также периоды, когда небо над ним было ясным. В среднем в 2000–2006 гг. всё поле было полностью покрыто облаками 273 дня в году, частично — 73 дня в году и только 19 дней в году небо было безоблачным. Самые пасмурные месяцы — январь, сентябрь и декабрь. В 2002 г. наблюдалось наибольшее число пасмурных дней, в 2005 г. — наименьшее. Отмечено также, что плотность облаков на тихоокеанской стороне гор намного больше, чем на противоположной. А поскольку плотность воздуха прямо пропорционально зависит от его влажности, был сделан вывод, что количество осадков в твёрдом виде западнее водораздельного хребта существенно больше, чем восточнее него.

При планировании мониторинга Патагонии с борта МКС в холодное для этой территории время года в 2002–2019 гг. и по реальным наблюдениям Е.О. Серовой, выполненным с октября 2014 г. по март 2015 г., установлена возможность целевой фотосъёмки ледников с вероятностью не более 10% времени пролёта МКС над обоими полями. Визуально обнаружено, что экранирование плотными облаками западной стороны обоих полей заведомо больше, чем восточной. Заметим, что все метеостанции в Патагонии расположены вдали от ледников, они фиксируют лишь общую тенденцию уменьшения осадков на региональном уровне.

Оледенение Патагонии формируется под влиянием очень благоприятных для этого климатических особенностей. Ярво выраженный западный ветровой



**Рис. 2.** Средние годовые аномалии температуры воздуха (а) и осадков (б) в Аргентине в 1961–2014 гг. по обобщённым данным метеостанций

**Fig. 2.** Mean annual anomalies of air temperature (a) and precipitation (b) in Argentine during 1961–2014 according to the data of meteorological stations

перенос способствует асимметричному распространению осадков на склонах меридиональных хребтов и влияет на динамику ледников. Значительные объёмы снега перераспределяются в результате метелевого переноса с западных склонов на восточные. На космических снимках особенно ярко отмечается разница в заснеженности противоположных склонов гор после длительных снегопадов.

На рис. 2 показано изменение температуры воздуха и осадков с 1961 г. Это – данные метеорологической службы Аргентины [7], которые объясняют главный фактор сокращения ледникового комплекса Патагонии. Из данной сводки следует, что в 1961–1984 гг. в Патагонии на разных метеостанциях этого региона отмечено общее для всех пунктов изменение среднегодовой температуры воздуха (от условного базового нулевого значения – температуры, характерной для начала 1960-х годов) от  $-0,5$  до  $+0,25$  °С. В 1985–2000 гг. зафиксировано превышение этого показателя от базового значения в среднем на  $0,30$  °С, в 2000–2010 гг. – на  $0,35$  °С, а в 2011–2014 гг. – на  $0,55$  °С. В работе [7] осреднённые по станциям значения годовых сумм осадков, за-

фиксированные в начале 1960-х годов, приняты за базовую (нулевую) величину, относительно которой предложено фиксировать положительные и отрицательные аномалии осадков в последующие временные интервалы. На рис. 2 видно, что в период 2002–2014 гг. превышение количества осадков от базового нулевого значения зафиксировано лишь дважды: на 25% в 2002 г. и на 22% в 2014 г. На протяжении других 11 лет – с 2003 по 2013 г. – отрицательные аномалии осадков составляли в среднем около 8%.

Ледники тихоокеанского склона в среднем крупнее и имеют обширные поля аккумуляции. Большинство ледников Северной Патагонии оканчивается в озёрах, поэтому механическая абляция и изменение температуры воды играют существенную роль в отступании их языков. Озёра обрамлены высокими моренными валами, которые маркируют исходные позиции ледников на начало их отступления (ледник Сан Рафаэль и др.). В ряде случаев на космических снимках отмечено обрушение на языки ледников значительных масс горных пород, что вызывает активизацию языков и оседание их нижних частей на дно озёр при достижении водной среды

(ледник Паред и др.). Все крупные ледники Южного ледникового поля Патагонии также оканчиваются в озёрах или фьордах, что приводит при разрушении нижних частей языков к образованию айсбергов. Отметим, что скорости движения льда на фронтальной части языка достигают, по нашим данным, в ряде случаев 10–20 м/сут. В ландшафте западного склона патагонских ледниковых полей выделяется решётчатая структура фьордов. Эти естественные каналы и огромные озёра показывают пути движения древних ледников, а моренные отложения – те позиции, до которых они экстремально распространялись.

Площади областей аккумуляции ледников намного превышают площади областей таяния. Согласно данным Атласа снежно-ледовых ресурсов мира [8], снегозапасы на большей площади обоих полей превышают 4000 мм в слое воды. Число дней со снежным покровом на западных склонах у концов ледников – более 300 в году. Аккумуляция–абляция на высоте границы питания ледников западного склона превышает 600 г/см<sup>2</sup> в год.

Ледники средней части Южного поля (Вьедма, Упсала, Брюгген, т.е. № 19, 20 и 29) отличаются оригинальным внешним обликом, сформированным под влиянием пепловых выбросов вулкана Лаутаро (высота 3607 м, координаты: 49,02° ю.ш., 73,55° з.д.), последнее извержение которого произошло в 1979 г. Вулкан покрыт льдом и возвышается на 1000 м над плато, из его кратера время от времени происходит эмиссия газов. Самые яркие следы извержения вулкан оставил на языке ледника Чико (№ 17).

В работе [9] определены изменения ледников в периоды между 1985, 2000 и 2011 гг. по трём последовательным съёмкам всего региона, сделанным со спутника Landsat. Анализ снимков выполнен с использованием автоматизированного картографирования площадей чистого льда и ручной коррекции облаков, водных поверхностей и теней, покрывающих ледники. Основной проблемой для точного определения площадей ледников стали большие объёмы выпавшего в эти годы сезонного снега, который осложнил дешифрирование ледников по снимкам из космоса. Изучив дистанционно все ледники Северного поля размером более 0,05 км<sup>2</sup>, авторы работы [9] установили, что в период с 1985 по 2000 г. их общая площадь уменьшилась с 1192 до 951 км<sup>2</sup>. К 2011 г. она сократилась ещё на 52 км<sup>2</sup>.

Таким образом, по заключению авторов, площадь ледников этого поля сократилась почти на 25%. Приведём результаты мониторинга изменений реакции горных ледников Северного и Южного ледниковых полей Патагонии (Южные Анды) на региональное потепление климата, выполненного с участием космонавтов РС МКС. Начало этих наблюдений относится к 2002 г.

### Методика исследований

Космические снимки, полученные ручными камерами, геометрически не корректны. Обработка этих изображений, особенно фрагментов снимков, на которых отображаются нижние части ледников, с помощью программы Global Mapper показала возможность их трансформирования даже в случае угловых отклонений от вертикали при съёмке до 30°. Существует возможность использования и многих других программных продуктов. Для измерений по снимкам, сделанным ручными фотокамерами, в данной работе мы использовали программу Global Mapper, версия 15. На район гор Патагонии в программе заложены топокарты вплоть до масштаба 1:10 000 и актуальные космические фотоснимки с разрешением на местности около 3 м в картографической проекции UTM WGS84. Снимки, полученные с РС МКС, трансформируются с помощью этой программы и образуют соответствующие слои информации, после чего выполняются измерения. Информационным ресурсом в данном исследовании послужили цифровые снимки, которые получают в натуральных цветах. Перед полётом каждый российский космонавт проходит подготовку по целевым заданиям программы «Ураган», включая и мониторинг ледников Патагонии. По ходу полёта задания дополняются. С экипажем поддерживается оперативная связь, включая технические средства Центра управления полётом МКС и электронную почту.

Совместный анализ картографического материала и космических снимков – путь к получению искомой информации. Дешифрирование границ ледников выполняется только вручную и требует высокого профессионального уровня. Наш опыт исследований показал, что топографические карты всего известного масштабного ряда содержат погрешности в отображении контуров ледников, осо-

бенно их окончаний. Карты масштабов 1:10 000 и 1:25 000 приемлемы для сравнительного анализа с данными космических снимков с разрешением на местности 2–5 м, а карты масштаба 1:50 000 рекомендуется использовать совместно с материалами орбитальных съёмок с детальностью 10–15 м.

Мы установили три существенных недостатка совмещения топографических карт и космических снимков при оценке величины перемещения фронтальных частей языков ледников. Первый – небольшое число опорных точек минимального размера, которые можно одновременно найти на карте и дешифровать на снимке. Эта трудность служит важной причиной часто встречающегося на практике несовмещения контуров. Второй недостаток связан с технологией картографирования ледников и их горного обрамления. Согласно [10], при составлении топографических карт масштабов 1:25 000 и 1:50 000 «средние ошибки в плановом положении твёрдых контуров относительно ближайших опорных пунктов и линий прямоугольной сетки не должны превышать на картах горных районов 0,75 мм от их масштаба». Это означает, что отклонения положения точек на местности могут не совпадать с их изображением на карте масштаба 1:25 000 на 18 м, а на карте масштаба 1:50 000 – на 36 м! Третий широко известный недостаток – на этапе составления топографических карт при дешифрировании материалов аэро- и космической фотосъёмки контуры ледников определяются исполнителями во многих случаях с большими погрешностями.

Для получения более корректных результатов мы воспользовались методом, впервые применённым Л.В. Десиновым и В.М. Котляковым ещё в конце 1970-х годов при изучении колебаний ледников Памира [1]. Его суть – измерение на космическом снимке перемещения точки поверхности ледника относительно контрольного створа, т.е. линии, соединяющей две реперные точки, расположенные на противоположных склонах или на береговых моренах. Точность таких измерений зависит от точности компьютерного нанесения этой линии на фотоснимок. Отметим, что в реальной работе по дешифрированию космических снимков, поступающих с борта РС МКС, при выборе реперной точки минимального размера её величина оказывается примерно в 2 раза больше, чем разрешение на местности снимка. В том случае, когда этот па-

раметр составляет 2–3 м, принимается погрешность измерения равная 4–6 м.

Рассмотрим пример измерения расстояния от произвольно выбранной точки поверхности ледника Вьедма до контрольного створа. Снимок сделан фотокамерой Nikon D3X, оснащённой объективом с фокусным расстоянием 1200 мм и 24-мегапиксельной матрицей. Во время съёмки МКС пролетала над Южным ледниковым полем Патагонии на высоте 360 км. От подспутниковой точки до осевой линии ледника было 92 км. Наклонная дальность – 371 км. Угол наклона поверхности ледника – около 10°. Несложный расчёт показывает, что в данном случае в центре кадра одному пикселю фотокамеры соответствует расстояние 1,79 м на местности. В том случае, когда величина сокращения ледника за время между съёмками в один год превышает 10 м, точность измерения в 4 м следует признать удовлетворительной.

### Обсуждение результатов

В результате выполненных работ установлены основные особенности изменений ледников обоих полей за три периода мониторинга с РС МКС: в 2002–2010, 2010–2016 и 2016–2019 гг. За начало каждого периода принимается декабрь, а за окончание – март, что соответствует началу и завершению летнего времени года в Патагонии. Заметим, что при сокращении ледника с образованием айсбергов очертание фронта каждого ледника существенно изменяется. Мы принимали за нижнюю точку языка ледника ту, которая лежит на окончании его осевой линии.

Сведения о динамике ледников показаны в таблице. Данных о ледниках *восточной экспозиции Северного ледникового поля Патагонии* в первом периоде мало, поэтому сравнить изменения во времени весьма сложно. Во втором периоде исследований установлено, что средняя скорость отступления ледника Паред Северный (№ 7) возросла с 90 до 380 м/год, а средние скорости сокращения трёх других ледников – Леонас (№ 1), Неф (№ 4) и Пискис (№ 9) – не изменялись в оба периода наблюдений (соответственно 17, 65 и 47 м/год). Ещё четыре ледника – Солер (№ 3), Паред Южный (№ 8) и ледники № 2 и 6 – находились в стационарном состоянии (см. таблицу).

На фоне отступления ледников этой территории два ледника в отдельные годы наступали. Длина языка ледника Нэф в 2009–2011 гг. возросла на 380 м, однако в последующие пять лет быстро уменьшилась. В итоге за 15 лет он сократился на 850 м. А ледник Колония (№ 5) в 2009–2015 гг. продемонстрировал три цикла увеличения и уменьшения длины своего языка. Однако негативная тенденция всё же преобладала: отмечено его сокращение на 910 м со средней скоростью 70 м/год. В 2016–2019 гг. получены сведения о четырёх ледниках этой территории: скорость отступления ледника Колония увеличилась на 13 м/год, ледника Неф уменьшились с 65 до 10 м/год, ледника Леонас сохранилась на уровне 17 м/год, а ледник Солер выдвигался по 80 м/год.

Для ледников *западной экспозиции Северного ледникового поля Патагонии* (см. таблицу) данные о первом периоде мониторинга практически отсутствуют. Получены сведения только о леднике Стеффэн (№ 10), который в 2007–2010 гг. наступал со средней скоростью 35 м/год, а в последующие шесть лет временами выдвигался в долину. В 2011 г. от него отделился айсберг длиной 1560 м. Затем ледник дважды наступал, выдвигаясь в озеро на 400 и 300 м, и дважды сокращался на 540 и 510 м с продуцированием айсбергов, но в целом за шесть лет сокращался со средней скоростью 318 м/год. Во вторую фазу мониторинга ледники Сан-Рафаэль (№ 13) и Гуалас (№ 14) сокращались по 33 и 70 м/год, а ледник Бенито (№ 11) отступил на 1790 м со средней скоростью около 300 м/год. Ледник Сан-Куинтин (№ 12) не изменил положения своего фронта. В третьем временном интервале положение фронтальной части ледника Сан-Куинтин сохранилось прежним, а ледник Стеффэн сокращался от 197 до 460 м/год. Ледники Сан-Куинтин, Сан-Рафаэль и Гуалас оканчиваются в больших озёрах. Крутые западные берега этих водоёмов, имеющие в плане плавные округлые формы, представляют собой конечные морены нескольких стадий оледенения.

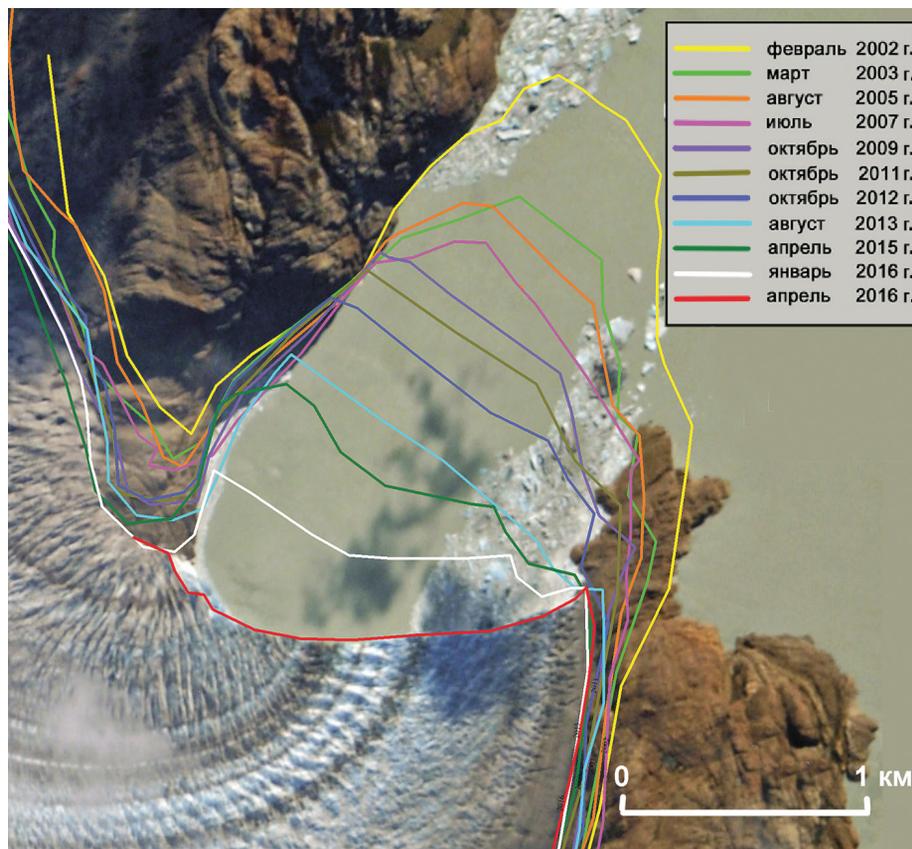
Ледники *восточной экспозиции Южного ледникового поля Патагонии* вошли в число репрезентативных объектов наиболее полно. В таблице дана информация о 14 ледниках. На протяжении первого цикла наблюдений пять ледников этой группы – О'Хиггинс (№ 16), Маркони (№ 18), Спегазинни (№ 21), Майо (№ 22) и Перито Морено

(№ 23) – сохраняли свою фронтальную часть без изменений [11]. В последующие шесть лет эта ситуация повторилась. Ледник Чико (№ 17) за первые два периода наблюдений сокращался со скоростью около 53 м/год. Сведения об этом леднике восходят к 1945 г. В 1945–1975 гг. он отступил на 1640 м, практически с той же средней скоростью около 55 м/год, но в 1975–2001 гг. сократился всего на 310 м со скоростью 12 м/год [12].

Таким образом, восемь ледников в первые два периода отступали со средней скоростью от 28 до 290 м/год. Не было зафиксировано ни одного случая продвижения их фронтальных частей. Подчеркнём, что средняя скорость сокращения ледников этой группы во второй период мониторинга возросла по сравнению с первым этапом наблюдений. Скорость отступления ледников была следующей, м/год: ледник Вьедма (№ 19) – с 133 до 252 (рис. 3), ледник Упсала (№ 20) – с 270 до 303 (рис. 4), ледник Фриас (№ 24) – с 20 до 37, ледник Синкуэнтенарио (№ 25) – с 20 до 70, ледник Диксон (№ 26) – с 30 до 115, ледник Тиндал (№ 27) – с 74 до 140, ледник Грей (№ 27) – с 70 до 143.

Один из самых известных ледников Патагонии Перито Морено в 1899–1939 гг. продвинулся вперёд на 1,5 км [5] и перегородил плотиной канал Темпанос, отрезав рукава Рико и Роко. Следующие 20 лет, до 1959 г., ледяная плотина то выдвигалась, то отступала, оставляя узкий проход между собой и скалами. С той поры фронт ледника регулярно (каждые 3–4 года) перегораживал этот залив, что приводило к повышению уровня воды в отрезанной части и последующему прорыву. По данным мониторинга ледника с борта орбитальных станций серий «Салют», «Мир» и МКС в период с 1977 по 2019 г. установлено, что ледник многократно после отступления на 50–60 м от скал вновь приближался к ним и перекрывал канал.

Ледник О'Хиггинс, стекающий на восток в оз. Сан-Мартин – самый первый объект гляциологического мониторинга с использованием космических снимков по научной программе Института географии РАН. 22 декабря 1977 г., всего через три месяца после запуска орбитальной станции «Салют-6», ледник попал в поле зрения фотоаппарата в тот момент, когда он продуцировал огромный ледяной массив площадью около 12 км<sup>2</sup>. Этот айсберг длиной 3,8 км полностью



**Рис. 3.** Изменения положения фронта ледника Вьедма в 2002–2016 гг.

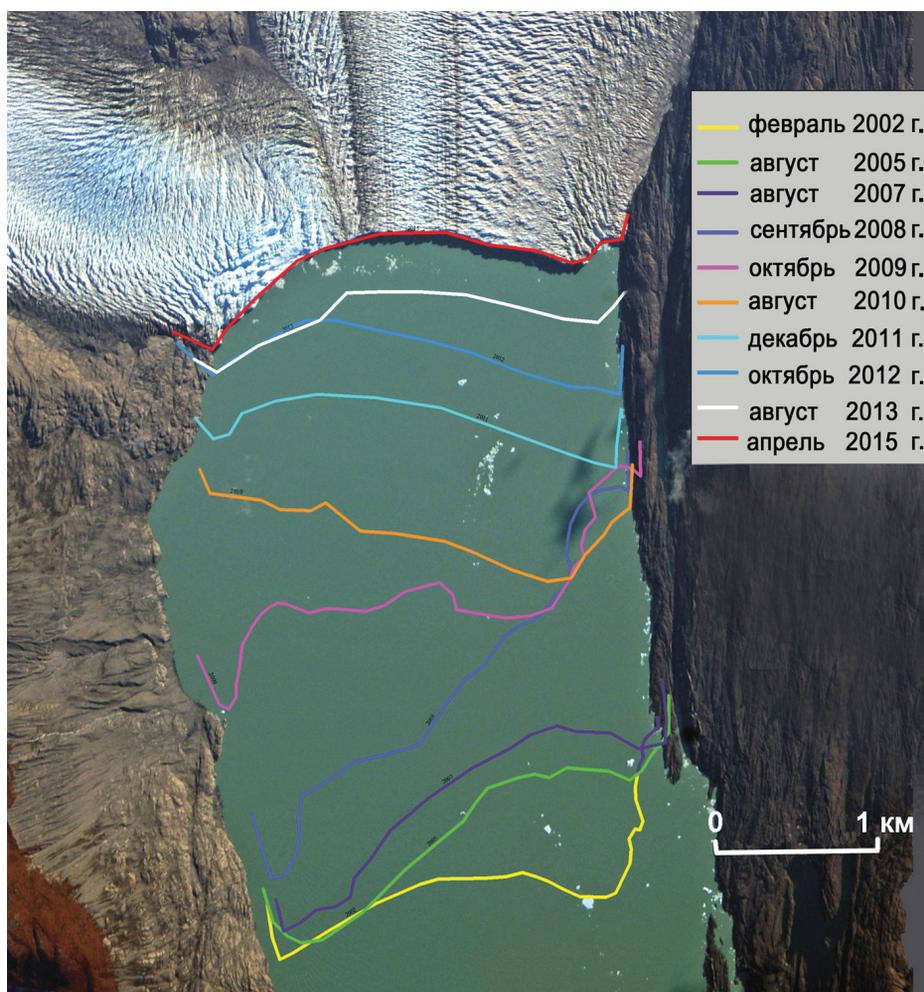
**Fig. 3.** Changes of positions of the Viedma Glacier front in 2002–2016

разрушился за 10 дней [5]. Отметим, что ледник О'Хиггинс активно отступал в период с 1935 по 1963 г., когда он сократился на 8 км [11]. Динамика ледника в 1963–1977 гг. авторам не известна. По данным фотосъёмки российских космонавтов, сделанной в 1977–2002 гг., установлено, что ледник стал короче ещё на 5,2 км. Таким образом, в XX в. за 67 лет ледник сократился, по крайней мере, на 17 км. Однако в 2002–2016 гг. фронт ледника О'Хиггинс не менял своего положения (см. таблицу). Очередной цикл отступления ледника пришёлся на третий период мониторинга с РС МКС, когда он сократился на 1250 м после образования айсберга площадью около 2 км<sup>2</sup>.

В третьем периоде мониторинга замечены небольшие изменения на следующих ледниках: на 40 м сократился ледник Упсала, на 50 м ледник Тиндал и на 70 м ледник Синкуэнтенарио. За три года на 340 м ускорилось отступление ледника Диксон и на 400 м — ледника Чико. После довольно долгого периода медленного сокращения ледник Фриас отступил на 840 м. Продолжалось ин-

тенсивное отступление ледника Вьедма, у которого зафиксировано уменьшение длины на 1180 м. Сохраняют положение своих фронтальных частей ледники Майо, Маркони и Перито Морено.

Колебания ледников *западной экспозиции Южного ледникового поля Патагонии* также отражены в таблице. Объектов исследований на этом склоне — четыре. Окончания языков у трёх из них растекаются в разных направлениях, которые условно можно назвать потоками. В первый период мониторинга ледник Греве сокращался очень активно. Его северный поток (№ 30а) отступил в 2006–2009 гг. на 1050 м, южный поток (№ 30б) — на 1650 м, но больше других сократился западный поток (№ 30в), освободив ото льда полосу озёрной поверхности шириной 2330 м. Северная часть окончания ледника Бернардо (№ 31а) отступила на 500 м, южная часть (№ 31б) — на 920 м, а западный поток (№ 31в) — на 1430 м. Ледник Джорже Монтт (№ 32) сократился на 1810 м. На втором этапе наблюдений три потока ледника Греве сократились соответственно на 50, 1140



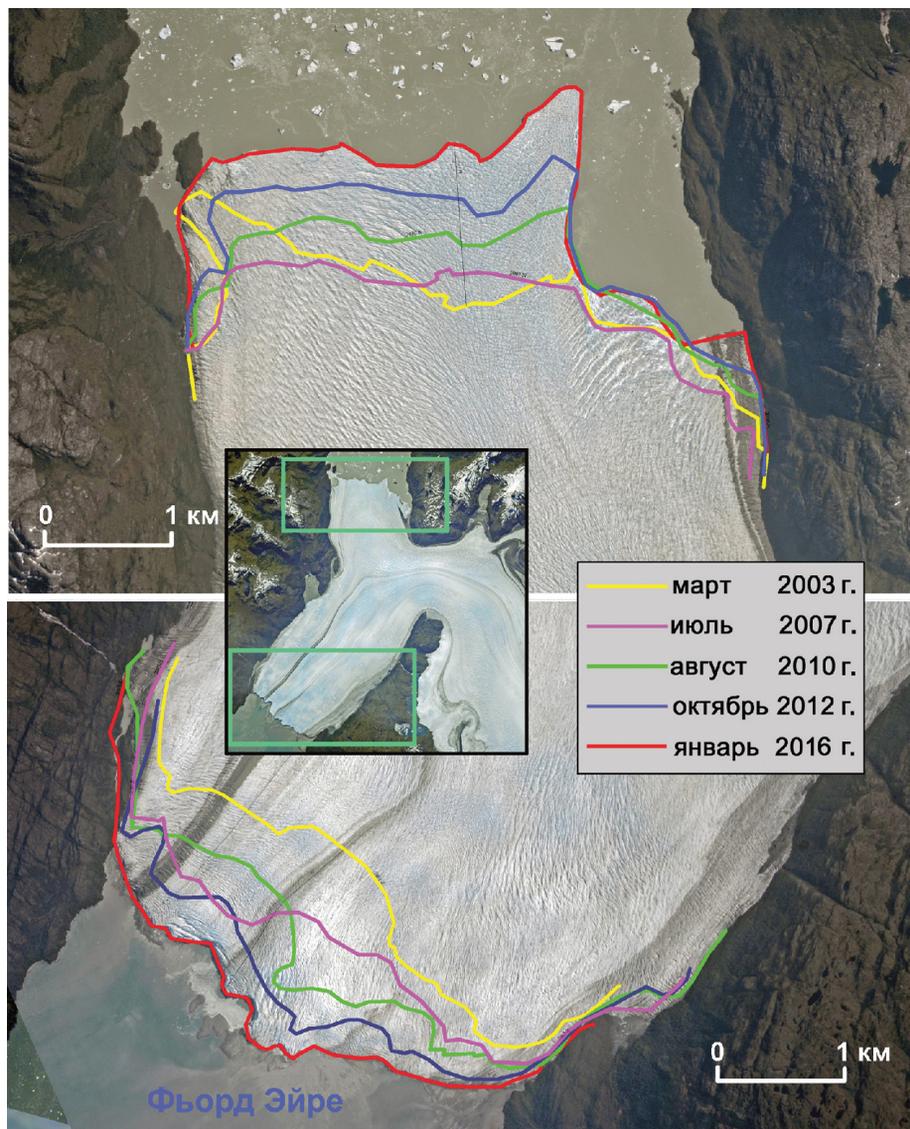
**Рис. 4.** Изменения положения фронта ледника Упсала в 2002–2015 гг.  
**Fig. 4.** Changes of positions of the Uppsala Glacier front in 2002–2015

и 1670 м, три окончания ледника Бернардо на выходе к фьорду – на 1050, 220 и 30 м, а ледник Джорже Монтт отступил на 1830 м.

В 2010–2016 гг. средняя скорость сокращения ледников по сравнению с 2002–2010 гг. уменьшалась, м/год: ледник Бергуэз – с 61 до 53, ледник Бернардо Южный – с 130 до 44, ледник Бернардо Западный – с 280 до нуля, ледник Джорже Монтт – с 362 до 325. Такие данные оказались неожиданными, как и многолетнее наступание соседнего гиганта – ледника Брюгген. Только на леднике Бернардо Северный во второй период сохраняется высокая скорость отступления – до 210 м/год. Следов даже временного увеличения длины языков ледников в этой части поля не обнаружено. Для третьего этапа исследований данных о динамике ледников этого района, к сожалению, нет.

Таким образом, сравнивая западные и восточные экспозиции обоих полей, заметим, что в 2001–2016 гг. скорости отступления ледников Северного ледникового поля отличаются почти втрое: на наветренной стороне гор – 157 м/год, а на подветренной – 51 м/год. На Южном ледниковом поле они разнятся примерно вдвое (соответственно 200 и 106 м/год).

Уникальный объект в Патагонии, да и во всей Южной Америке – ледник Брюгген (№ 29). Он стекает на запад с Южного ледникового поля во фьорд Эйре (рис. 5), образуя мощную ледяную плотину шириной около 6 км, создающую подпор для пресной части фьорда. В работе [5] отмечено, что в 1830 г. ледник Брюгген (Пия XI) находился на суше, далеко от фьорда Эйре, а за 100 лет приблизился к нему на 7,2 км. Затем к 1945 г. ледник отступил на 2,8 км, но к 1966 г.



**Рис. 5.** Изменения положения северного и южного окончаний ледника Брюгген (Пия XI) в 2003–2016 гг.  
**Fig. 5.** Changes in positions of the northern and southern ends of the Bruggen Glacier (Pio XI) in 2003–2016

перекрыл фьорд мощной плотиной, за которой образовался пресный водоём, получивший название оз. Эйре, уровень воды в котором превышает на 150 м уровень воды во фьорде ниже продвинувшегося ледника. К 1977 г., когда ледник попал в поле зрения фотоаппаратов на орбитальной станции «Салют-6» [5], он оказался длиннее по сравнению с положением своего фронта в 1945 г. на 9 км, а его площадь увеличилась на 65 км<sup>2</sup>. В 2002–2016 гг. выдвижение ледника Брюгген во фьорд продолжалось. В первой половине исследуемого периода средняя скорость наступания северного потока (№ 29а) составляла 71 м/год, а во второй половине возрос-

ла вдвое, при этом ледник удлинился на 1350 м. В южном направлении язык ледника (№ 29б) выдвигался со средней скоростью 137 м/год, а в 2010–2016 гг. скорость выдвижения составила 148 м/год, в целом он выдвинулся к югу на 1960 м, при этом средние скорости выдвижения составили соответственно 112 и 154 м/год. Такая динамика двух его потоков сохраняется и в 2016–2019 гг.: она составила в среднем соответственно 104 и 142 м/год.

Разгадка этого феномена ещё впереди, но важными факторами в жизни ледника служат огромная область питания, на которой откладывается снег, поступающий со стороны Тихо-

го океана, и выбросы пепла из жерла вулкана Лаутаро, расположенного в его верховье. Повышенная аккумуляция снега в области питания ледника Брюгген вызывается особенностями орографии Южного ледникового поля Патагонии: в его средней части протяжённый горный хребет окаймляет обширную высоко поднятую область аккумуляции ледника, а верхняя зона северной и южной частей поля представляет собой области бифуркации ледникового покрова, где водораздел поля выражен очень слабо, поэтому влагонесущие воздушные потоки его беспрепятственно преодолевают. Оценку изменения площади ледников Патагонии за последние 19 лет мы не проводили. Заметим, однако, что ширина их языков уменьшалась [9].

### Выводы

В результате дешифрирования и анализа фотоснимков Северного и Южного ледниковых полей Патагонии, полученных космонавтами с борта РС МКС, сделан вывод о преобладающем отступании ледников этого горного региона в 2002–2019 гг. В периоды потепления, которые были отмечены метеорологическими службами Чили и Аргентины во второй половине XX и в начале XXI в., западные склоны Южных Анд получали больше твёрдых осадков, чем восточные, где их количество существенно уменьшилось, что привело к сокращению питания ледников.

Анализ динамики 31 языка ледника (кроме ледника Брюгген), из которых три имеют несколько потоков, на обоих ледниковых полях Патагонии показал следующую картину: фронтальные части 9 ледников сохраняли без изменений своё положение, а другие 22 ледника сокращались со средней скоростью от нескольких десятков до 430 м/год. В отдельных случаях годовое сокращение ледников достигало 500–700 м, а от ледника Стеффэн в 2011 г. откололся

айсберг длиной 1560 м. В ряде случаев вместе с постепенным уменьшением площади фронтальной части выводных ледников от них откалывались крупные массивы льда, которые образовывали обширные поля айсбергов.

Скорость отступления ледников западных склонов обоих полей превышала скорости сокращения ледников, расположенных восточнее водораздельного хребта. На западной стороне Северного поля она достигала 300 м/год, а на восточной – 80 м/год; на западной и восточной сторонах Южного поля она соответственно была равна 431 и 90 м/год. И лишь длина четырёх ледников на Северном ледниковом поле в отдельные временные интервалы возрастала. Как видно, в целом ледники Южного ледникового поля за рассматриваемые годы сократились больше ледников Северного ледникового поля. Особого внимания заслуживает ледник О'Хиггинс, от которого в 1977 г. откололся ледяной массив площадью около 12 км<sup>2</sup>, а спустя почти 40 лет – айсберг площадью около 2 км<sup>2</sup>.

Динамика ледника Брюгген (Пия XI) не типична для рассматриваемого района: многие годы этот ледник наступает, а длина двух потоков его языка в 2002–2016 гг. возросла – северного потока на 1350 м, а южного на 1960 м. Вероятные причины заключаются в орографии ледникового бассейна и обширной области аккумуляции, что поддерживает сохранение размеров двух выводных потоков и даже их продвижение во фьорд Эйре.

Наблюдения за состоянием Северного и Южного ледниковых полей Патагонии с участием российских космонавтов будут продолжены.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А19-119022190168-8.

**Acknowledgments.** This research was supported in the frame of fundamental scientific research АААА-А19-119022190168-8.

### Литература

1. Lopez P., Sirguey P., Arnaud Y., Pouyaud B., Chevallier P. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006) // *Global and Planetary Change*. 2008. V. 1. P. 103–116. Электронный доступ: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

### References

1. Lopez P., Sirguey P., Arnaud Y., Pouyaud B., Chevallier P. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006). *Global and Planetary Change*. 2008, 1: 103–116. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

2. Гарелик И.С., Книжников Ю.Ф., Котляков В.М., Кравцова В.И., Кренке А.Н., Лабутина И.А. О перспективах использования космических снимков для гляциологических целей // МГИ. 1973. Вып. 22. С. 21–29.
3. Антонова С.Ю., Десинов Л.В., Котляков В.М., Суслов В.Ф. Возможности использования мелкомасштабных космических снимков для изучения динамики ледников // МГИ. 1977. Вып. 30. С. 146–160.
4. Десинов Л.В. Активизация ледников в бассейне р. Обихингоу на Памире // МГИ. 1977. Вып. 29. С. 49.
5. Десинов Л.В., Носенко Г.А. Космическое зондирование Земли. Эксперименты на орбитальной станции «Салют-6». Берлин: Академии-Ферлаг, 1983. С. 156–162, 212–217.
6. Clima en Argentina. Servicio Meteorológico Nacional. Argentina. Modeofaccess. Электронный ресурс: <http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/?mod=el-clima&id=1>.
7. The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental. Электронный ресурс: [https://books.google.co.uk/books?id=g4bkBwAAQBAJ&pg=PA29&lpg=PA29&dq=cloudy+in+Patagonia+Ice+Field&source=bl&ots=wq2tZSZ6ks&sig=rE5OMVDOC0CeeEz7haFSfb0wZNI&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKewjOqu3er4\\_SAhUB5yYKHSrNBd04ChDoAQggMAA#v=onepage&q=cloudy%20in%20Patagonia%20Ice%20Field&f=false](https://books.google.co.uk/books?id=g4bkBwAAQBAJ&pg=PA29&lpg=PA29&dq=cloudy+in+Patagonia+Ice+Field&source=bl&ots=wq2tZSZ6ks&sig=rE5OMVDOC0CeeEz7haFSfb0wZNI&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKewjOqu3er4_SAhUB5yYKHSrNBd04ChDoAQggMAA#v=onepage&q=cloudy%20in%20Patagonia%20Ice%20Field&f=false).
8. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: РАН, 1997. 392 с.
9. Frank Paul, Nico Molg. Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011 // Journ. of Glaciology. 2014. V. 60. № 224. P. 1033–1043. doi: 10.3189/2014Jog14J104.
10. Основные положения по содержанию топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000. М.: ГУГК при СМ СССР и ВТУ Генштаба СССР в редакции 2011 г.
11. Cassasa G., Brecher H., Rivera A., Aniya M. A century-long recession record of Glacier O'Higgins, Chilean Patagonia // Annals of Glaciology. 1997. V. 24. P. 106–110.
12. Riverra A., Casassa G., Bamber J., Käab A. Ice-elevation changes of glacier Chico, southern Patagonia, using ASTER DEMs, aerial photographs and GPS data // Journ. of Glaciology. 2005. V. 51. № 172. P. 105–112.
2. Garelik I.S., Knizhnikov Yu.F., Kotlyakov V.M., Kravtsova V.I., Krenke A.N., Labutina I.A. On perspectives of use of space images for glaciological aims. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1973, 22: 21–29. [In Russian].
3. Antonova S.Yu., Desinov L.V., Kotlyakov V.M., Mikhailov V.M., Suslov V.F. Possibilities of use of small scale space images for the study of glacier dynamics. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1977, 30: 146–160. [In Russian].
4. Desinov L.V. Activation of glaciers in the basin of Obikhingou River at the Pamirs. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1977, 29: 49. [In Russian].
5. Desinov L., Nosenko G. Sudliches Glasialfeld von Patagonien. Fotografische Fernerkundung der Erde. Experimente auf der Orbitalstation «Salut-6». Berlin: Akademie-Verlag, 1983: 156–162, 212–217. [In Russian].
6. Clima en Argentina. Servicio Meteorológico Nacional. Argentina. Modeofaccess. Электронный ресурс: <http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/?mod=el-clima&id=1>.
7. The Patagonian Icefields: A Unique Natural Laboratory for Environmental. Электронный ресурс: [https://books.google.co.uk/books?id=g4bkBwAAQBAJ&pg=PA29&lpg=PA29&dq=cloudy+in+Patagonia+Ice+Field&source=bl&ots=wq2tZSZ6ks&sig=rE5OMVDOC0CeeEz7haFSfb0wZNI&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKewjOqu3er4\\_SAhUB5yYKHSrNBd04ChDoAQggMAA#v=onepage&q=cloudy%20in%20Patagonia%20Ice%20Field&f=false](https://books.google.co.uk/books?id=g4bkBwAAQBAJ&pg=PA29&lpg=PA29&dq=cloudy+in+Patagonia+Ice+Field&source=bl&ots=wq2tZSZ6ks&sig=rE5OMVDOC0CeeEz7haFSfb0wZNI&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKewjOqu3er4_SAhUB5yYKHSrNBd04ChDoAQggMAA#v=onepage&q=cloudy%20in%20Patagonia%20Ice%20Field&f=false).
8. World Atlas of Snow and Ice Resources. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p. [In Russian].
9. Frank Paul, Nico Molg. Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011. Journ. of Glaciology. 2014, 60 (224): 1033–1043. doi: 10.3189/2014Jog14J104.
10. The main position on the content of topographic maps in scale 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000. Moscow: Edition of 2011. [In Russian].
11. Cassasa G., Brecher H., Rivera A., Aniya M. A century-long recession record of Glacier O'Higgins, Chilean Patagonia. Annals of Glaciology. 1997, 24: 106–110.
12. Riverra A., Casassa G., Bamber J., Käab A. Ice-elevation changes of glacier Chico, southern Patagonia, using ASTER DEMs, aerial photographs and GPS data. Journ. of Glaciology. 2005, 51 (172): 105–112.