

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324

## Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в.

© 2013 г. А.Я. Муравьев, Г.А. Носенко

Институт географии РАН, Москва

*anton-yar@rambler.ru**Статья принята к печати 30 июля 2012 г.*

Камчатка, Каталог ледников, космическая съёмка, сокращение ледников.  
Glacier inventory, glacier recession, Kamchatka, space survey.

По спутниковым снимкам ASTER, материалам Каталога ледников СССР и аэрофотоснимкам 1950 г. оценено изменение площадей ледников северной части Срединного хребта на Камчатке с 1950 по 2002 г. За это время площадь ледников здесь сократилась на 16,6%, а 36 ледников, представленных в Каталоге ледников СССР, на снимках ASTER не обнаружены. Более всего сократились ледники с ориентацией на юг и юго-восток. Сокращение ледников соответствует изменениям основных климатических факторов: в этот период средние летние температуры воздуха возрастали, а количество твёрдых осадков сокращалось.

### Введение

Оледенение Камчатки существует в условиях благоприятного, ярко выраженного морского климата и приурочено, в основном, к областям современного и древнего вулканизма. В таких районах в результате больших высот вулканов и их открытости воздушным потокам влияние климата особенно отчётливо проявляется в балансе массы ледников и его изменениях, которые по сравнению с невулканическими регионами гораздо быстрее следуют за климатическими флуктуациями. Основные центры современного оледенения — Ключевская группа вулканов, Срединный хребет и Кроноцкий полуостров — находятся соответственно в районах активных современных вулканов, позднплейстоценовых потухших вулканов и невулканических гор.

Согласно недавним исследованиям, на Камчатке находится 448 ледников общей площадью около 905 км<sup>2</sup> [6]. Более 80% занятой ими территории приходится на Срединный хребет и Ключевскую группу вулканов, что объясняется их большой высотой. Индекс океаничности, который учитывает годовую амплитуду температуры и количество осадков за гидрологический год, для отдельных районов Камчатки

отличается в 3–3,5 раза [2]. Дополнительный фактор, влияющий на режим ледников, — непосредственная близость к очагам современного вулканизма. Тем не менее, именно благодаря интенсивности и многообразию внешних факторов, наблюдения за эволюцией ледников Камчатки помогают исследовать происходящие в настоящее время изменения климата.

Изученность ледников, расположенных в названных районах Камчатки, и регулярность наблюдений на них неодинакова. Исторически основное внимание учёных привлекали ледники Авачинской и Ключевской групп, находящиеся под непосредственным влиянием активного вулканизма. Гораздо менее изучены ввиду их труднодоступности более интересные в климатическом отношении ледники Срединного хребта. В настоящее время информация о современном состоянии ледников этого района Камчатки практически отсутствует. Цель данной работы — восполнить пробел, возникший в последние десятилетия в исследованиях ледников Камчатки, а также определить интенсивность и тренды изменений ледников Срединного хребта на фоне общего сокращения ледниковых систем Северной Евразии.



Рис. 1. Район исследований  
Fig. 1. Region under study

### Район исследований

Район исследований охватывает северную часть Срединного хребта (п-ов Камчатка) от  $57^{\circ}15'$  до  $59^{\circ}10'$  с.ш. (рис. 1) и представляет собой цепь вулканов, высотой 1700–2600 м, которые сформировались в позднеплейстоценовое время. Они хорошо сохранились, чётко выражены в рельефе и слабо эродированы. Климатические условия района определяются особенностями атмосферной циркуляции над северо-восточной частью Охотского моря и над Беринговым морем. В зимний период здесь развивается антициклоническая деятельность, определяемая колымским гребнем Сибирского антициклона, а в остальное время господствует активная циклоническая деятельность, достигающая максимума в сентябре и октябре. Источники поступления осадков — Охотское и Берингово моря. Максимум выпадения осадков приходится на осевую зону Срединного хребта. На высоте 1500–1800 м годовая сумма осадков превышает 2000–2500 мм [7].

Преобладающая часть ледников приурочена к водоразделу Срединного хребта. Кроме того, на восточном склоне изолированный центр ледников представляет собой вершина Снеговая (вулкан Снежный). Пологие водораздельные про-

странства между вулканическими постройками заполнены перемётными ледниковыми комплексами, в которых от общего фирнового поля в противоположные стороны спускаются долинные ледники (Начикинский, Кевенэй, Гречишкина и др.). Большинство изолированных ледников занимают унаследованные от верхнечетвертичного оледенения ледниковые формы рельефа — цирки, кары и т.д. Экспозиции ледников определяются северо-северо-восточным направлением водораздела и наличием отрицательных форм рельефа, которые они занимают. Северная часть Срединного хребта по сравнению с другими районами Камчатки изучена слабо.

Первая экспедиция с целью комплексного изучения вулканов и ледников была организована Камчатским отделом Географического общества СССР летом 1964 г. Её основные результаты, опубликованные в отчёте, содержат общую характеристику обнаруженных там ледниковых форм [1]. Повторные гляциологические исследования в этом районе проводились на леднике Гречишкина в 1979 г. и предусматривали геодезические измерения и балансовые наблюдения [7]. С тех пор других гляциологических исследований на ледниках Срединного хребта не проводилось.



### Материалы и методы изучения

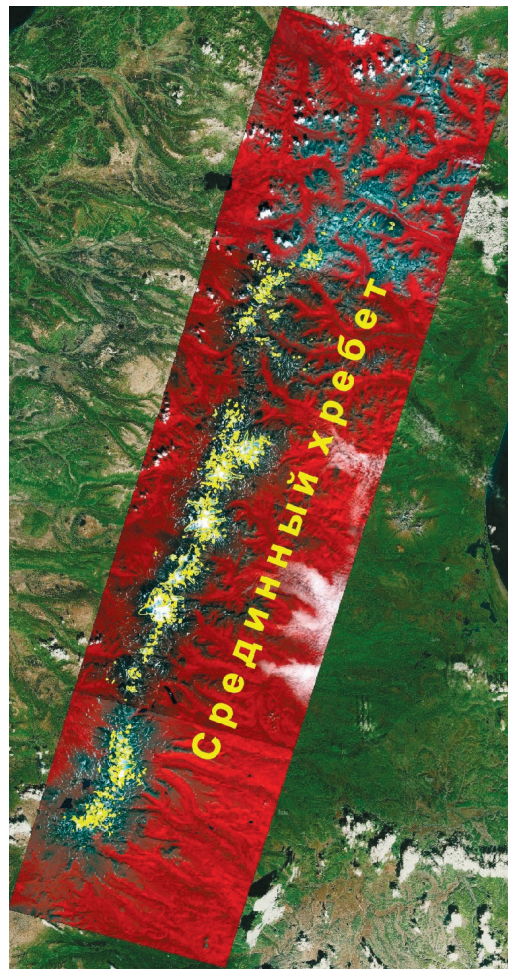
В работе использованы следующие материалы: четыре космических снимка ASTER (18.08.2002) с пространственным разрешением 15 м; аэрофотоснимки (АФС) августа 1950 г.; топографические карты масштаба 1 : 100 000; данные Каталога ледников СССР. Дополнительной информацией служили материалы наблюдений на ГМС Ключи и Усть-Воямполка с 1950 по 2006 г. (сайт ВНИИГМИ-МЦД: [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)). Для определения современных границ ледников проведено дешифрирование орторектифицированных спутниковых снимков ASTER, зарегистрированных при обработке в архиве NASA в проекции WGS 1984 UTM Zone 57N (рис. 2).

Проверка точности регистрации снимков выполнена с использованием сети из 12 наземных контрольных точек (GCP), координаты которых предварительно определялись с помощью топографических карт масштаба 1 : 100 000. Величина среднеквадратичной ошибки ( $RMSE_{x,y}$ ) не превышала 14,2 м. Вклад этой ошибки в подсчёт площадей ледников оценивали путём построения буферной зоны вдоль границ ледников. Ширина зоны выбрана как половина максимальной величины  $RMSE_{x,y}$ . Полученная величина ошибки зависит от размеров ледника и находится в диапазоне от 5,6 до 1,2% для ледников площадью от 0,5 до 30 км<sup>2</sup> соответственно. Учитывая распределение исследуемых ледников по размерам, полученная нами ошибка составила порядка 2,7%.

Оцифровка границ ледников проведена вручную по синтезированным изображениям, созданным из трёх каналов ASTER, нм: 0,52–0,6; 0,63–0,69; 0,78–0,86. Для обработки использовали программные продукты ArcGIS 9.3, GlimsView и ENVI 3.4. Поскольку съёмка выполнялась в конце периода абляции, то погрешностью, обусловленной присутствием сезонного снежного покрова, можно было пренебречь. Ошибки дешифрирования границ ледников, связанные с наличием моренного покрова на их поверхности, приняты равными 1% по аналогии с результатами работ, проведённых ранее на ледниках Алтая [9]. Итоговая погрешность оценки площадей ледников составила 2,9%.

### Результаты исследований

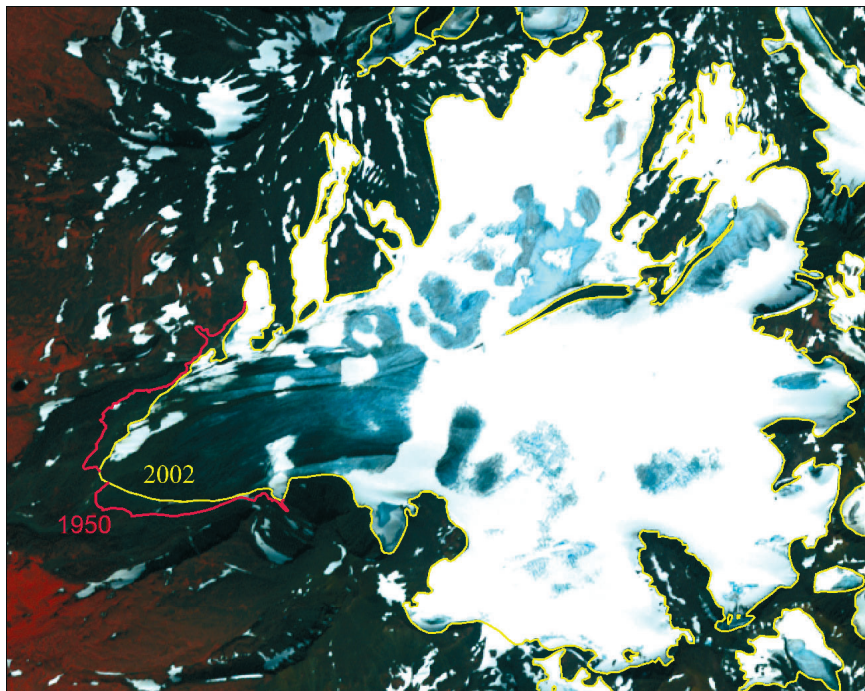
Полученные результаты дешифрирования границ ледников использованы для оценки изменений ледников Камчатки с 1950 по 2002 г. В качестве основного массива исходной инфор-



**Рис. 2.** Снимки ASTER (18.08.2002), зарегистрированные в проекции WGS 1984 UTM Zone 57N, и результаты дешифрирования границ ледников

**Fig. 2.** ASTER images (18.08.2002), registered in projection WGS 1984 UTM Zone 57N, and results of glaciers outline detection

мации взяты данные Каталога ледников СССР. Поскольку он создавался на основе неоднородных массивов данных (топокарты, нетрансформированные аэрофотоснимки и наземные наблюдения на ледниках), возникла необходимость оценки заложенной в них погрешности. К сожалению, нам не удалось провести такую оценку в полной мере с использованием имевшихся в нашем распоряжении аэрофотоснимков августа 1950 г., так как остатки сезонного снежного покрова препятствовали качественному дешифрированию границ ледников и созданию статистически значимой выборки. Тем не менее, такая попытка была предпринята для двух самых крупных ледников этого района — Гречишкина и Слюнина (рис. 3). Для этого было выполнено трансформирование фрагментов



**Рис. 3.** Изменение положения границы языка ледника Слюнина: жёлтая линия — по данным ASTER, 2002 г.; красная линия — АФС, 1950 г.  
**Fig. 3.** Change of outline position of the Slunina Glacier: yellow line — ASTER, 2002; red line — air photo, 1950

АФС, содержащих изображения языков ледников. Привязка аэрофотоснимков проводилась в программном пакете ArcGIS 9.3; основой служили орторектифицированные снимки ASTER. Среднеквадратичная погрешность совмещения снимков ( $RMSE_{x,y}$ ) составила 7,6 м. Сравнение полученных результатов с данными Каталога показало, что расхождение в площадях ледников составляет 2,2% для ледника Гречишкина и 0,7% — для ледника Слюнина. Эти цифры сопоставимы с аналогичными оценками, выполненными для Каталогов ледников Алтая и Тянь-Шаня, где ошибки не превышали 5% [4].

По данным Каталога ледников СССР, в районе, охваченном обработанными снимками, было 197 ледников, из которых 22 ледника к 2002 г. распались. При дешифрировании орторектифицированных снимков ASTER на северную часть Срединного хребта обнаружено 388 ледников. Из них 139 ледников соответствуют ледникам, отмеченным в Каталоге и сохранившим свою целостность; 59 — сегменты 22 распавшихся ледников; 190 — ледники, обнаруженные на спутниковых снимках, но не представленные в Каталоге. 36 ледников, представленных в Каталоге, не были обнаружены на снимках ASTER.

Большое число ледников, обнаруженных на спутниковых снимках, но не отмеченных в Каталоге, объясняется прежде всего их малыми

**Таблица 1.** Распределение по размерам ледников, обнаруженных на снимках ASTER (18.08.2002), но не идентифицированных по Каталогу ледников СССР

| Размер ледника, км <sup>2</sup> | Площадь ледника в 2002 г., км <sup>2</sup> | Число ледников в 2002 г. |
|---------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| 1–2                             | 6,47                                       | 5                        |
| 0,5–1                           | 9,31                                       | 14                       |
| 0,1–0,5                         | 25,96                                      | 116                      |
| < 0,1                           | 2,92                                       | 55                       |
| <i>Всего</i>                    | 44,66                                      | 190                      |

размерами. Из 190 ледников этой группы 55 имеют площадь менее 0,1 км<sup>2</sup> (табл. 1). Статистика по ледникам такого размера в Каталоге на территории Камчатки отсутствует. Ещё 116 ледников имеют площадь от 0,1 до 0,5 км<sup>2</sup>. Отметим, что в районе исследований широко распространены крупные многолетние снежники, сопоставимые по размерам с небольшими ледниками. В.Н. Виноградов, который был редактором «Каталога ледников СССР. Ч. 2–4. Т. 20 (Камчатка)», отмечал, что в некоторых случаях по строению снежники можно принять за ледники малых форм [1]. Вывод этот был сделан по немногочисленным полевым наблюдениям. Несмотря на то, что большая часть таких образований состояла из льда, мощностью до 8–10 м, они были отнесены к

Таблица 2. Изменение площади ледников с 1950 по 2002 г. в северной части Срединного хребта в зависимости от их размеров

| Размер ледника, км <sup>2</sup> | Площадь по Каталогу, км <sup>2</sup> | Площадь в 2002 г., км <sup>2</sup> | Изменение площади ледника с 1950 по 2002 г., км <sup>2</sup> /% | Число ледников |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|
| > 5                             | 143,7                                | 140,74                             | -3,0/-2,1                                                       | 15             |
| 2–5                             | 89,4                                 | 80,76                              | -8,6/-9,7                                                       | 44             |
| 1–2                             | 46,8                                 | 27,01                              | -19,8/-42,3                                                     | 27             |
| 0,5–1                           | 29,7                                 | 22,52                              | -7,2/-24,2                                                      | 38             |
| <i>Итого</i>                    | 309,6                                | 271,03                             | -38,57/-12,5                                                    | 124            |
| < 0,5                           | 38,7                                 | 19,62                              | -19,1/-49,3                                                     | 74             |
| <i>Всего</i>                    | 348,3                                | 290,65                             | -57,7/-16,6                                                     | 198            |

Таблица 3. Изменение площади ледников с 1950 по 2002 г. в северной части Срединного хребта в зависимости от их экспозиции

| Экспозиция ледника | Площадь ледника в км <sup>2</sup> , 1950 г./2002 г. | Изменение площади ледника с 1950 по 2002 г., км <sup>2</sup> /% | Число ледников по Каталогу | Средний размер ледника в 2002 г., км <sup>2</sup> |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|
| Северная           | 40,3/36,76                                          | -3,54/-8,8                                                      | 24                         | 1,53                                              |
| Северо-восточная   | 52,1/47,86                                          | -4,24/-8,1                                                      | 14                         | 3,42                                              |
| Восточная          | 69,8/55,64                                          | -14,16/-20,3                                                    | 27                         | 2,06                                              |
| Юго-восточная      | 31,8/18,96                                          | -12,84/-40,4                                                    | 22                         | 0,86                                              |
| Южная              | 11,6/8,92                                           | -2,68/-23,1                                                     | 11                         | 0,81                                              |
| Юго-западная       | 44,8/38,74                                          | -6,06/-13,5                                                     | 7                          | 5,53                                              |
| Западная           | 61,3/55,57                                          | -5,73/-9,3                                                      | 25                         | 2,22                                              |
| Северо-западная    | 36,6/28,20                                          | -8,40/-23,0                                                     | 31                         | 0,91                                              |
| <i>Всего</i>       | 348,3/290,65                                        | -57,65/-16,6                                                    | 161                        | 1,81                                              |

снежникам-перелеткам из-за отсутствия «выраженного движения». С учётом исследований последних лет на плато Путорана и Полярном Урале, подобный вывод и его распространение на весь массив Острая-Хувхойтун недостаточно обоснован. Кроме результатов исследований 1964 и 1979 гг., других гляциологических материалов полевых наблюдений в этом районе нет. Всё это — одна из возможных причин, объясняющих разницу в числе ледников между Каталогом и результатом наших исследований.

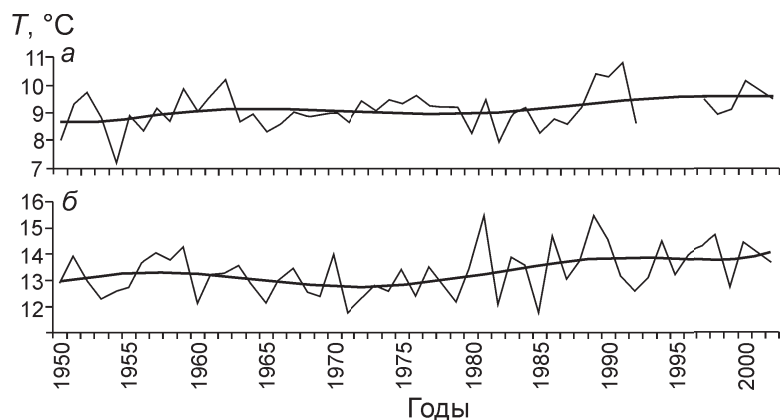
Чтобы оценить, как изменилась площадь ледников района исследований с 1950 по 2002 г., мы сравнили данные Каталога и результаты дешифрирования снимков ASTER (выборка ограничивалась ледниками, представленными в Каталоге). Для анализа ледники разбивались на пять групп в зависимости от их размера в 2002 г., км<sup>2</sup>: > 5; 2–5; 1–2; 0,5–1; < 0,5 (табл. 2). Для каждой группы определена величина сокращения площади в км<sup>2</sup> и %. Выполненная работа позволила констатировать, что крупнейшие ледники района сократили свою площадь незначительно (2,1% для группы ледников > 5 км<sup>2</sup>). С уменьшением размеров ледников

анализируемой выборки их сокращение по сравнению с начальной площадью увеличивается (в %). В табл. 2 видно, что максимально (49,3%) сократились ледники, площадью менее 0,5 км<sup>2</sup>. Однако для этой группы характерны максимальные погрешности и данных Каталога, и данных дешифрирования на пределе разрешающей способности космических снимков ASTER [5].

Анализ сокращения площади ледников в зависимости от их экспозиции (табл. 3) показал, что более всего сократилась площадь ледников с ориентацией на юг, юго-восток и северо-запад — 23,1, 40,4 и 23,0% соответственно. Меньше всего сократились ледники северной и северо-восточной экспозиций — 8,8 и 8,1% соответственно. Средняя площадь ледников, ориентированных на юг, юго-восток и северо-запад, мала относительно других групп (от 0,81 до 0,91 км<sup>2</sup>), т.е. среди них существенную долю составляют ледники, площадью менее 0,5 км<sup>2</sup>, для которых характерны наибольшие погрешности измерений.

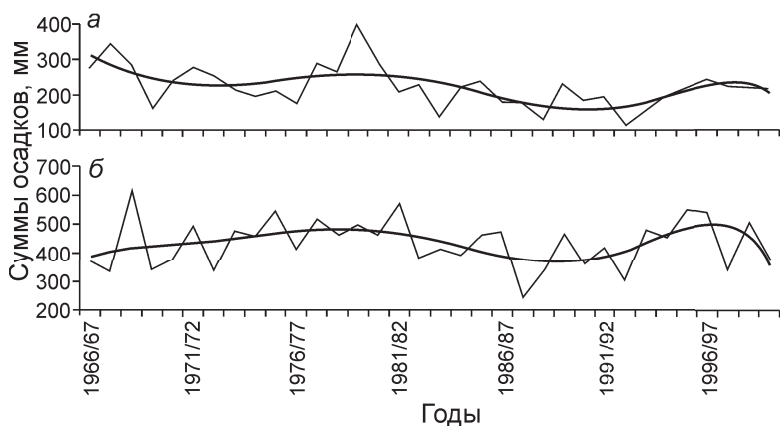
В целом оледенение северной части Срединного хребта с 1950 по 2002 г. сократилось на 16,6%. Если исключить из рассмотрения группу ледников, площадью менее 0,5 км<sup>2</sup>, для которой





**Рис. 4.** Многолетний ход средней летней температуры воздуха на ГМС Усть-Воямполка (а) и Ключи (б)

**Fig. 4.** Average summer air temperature at meteorological stations Ust-Voyampolka (a) and Kluchi (b)



**Рис. 5.** Многолетний ход сумм осадков с октября по май на ГМС Усть-Воямполка (а) и Ключи (б)

**Fig. 5.** Precipitation sum from October to May at meteorological stations Ust-Voyampolka (a) and Kluchi (b)

характерны наибольшие погрешности данных Каталога и материалов дешифрирования снимков ASTER, то мы получим величину сокращения 12,5%. Вероятно, данная цифра точнее характеризует реакцию ледников на современные изменения климата.

### Обсуждение

Для анализа климатических изменений мы проанализировали данные наблюдений ГМС Ключи и Усть-Воямполка за 1950–2006 гг. Это – ближайшие к району исследований метеостанции, данные которых доступны в настоящее время. Анализировались средние летние (с июня по август) температуры приземного воздуха за 1950–2006 гг. и суммы осадков с октября по май (период аккумуляции на ледниках района) за 1966–2006 гг. Летние температуры воздуха в 1989–2006 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. в среднем выросли на 1 °C на ГМС Ключи и на 0,6 °C на ГМС Усть-Воямполка (рис. 4). Суммы твёрдых осадков на этих же станциях в 1989–2006 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 3,5 и 20,8% соответственно

(рис. 5). По данным А.Б. Шмакина, в районе исследований отмечается сокращение сумм твёрдых осадков в 1989–2006 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. в среднем на 10–20% [8]. Вместе с тем продолжительность залегания снежного покрова не изменилась. ГМС Ключи также находится в районе, где отмечено сокращение количества выпадающих твёрдых осадков от 0 до 10% [8]. Таким образом, можно сделать вывод, что сокращение площадей ледников Срединного хребта соответствует изменениям основных климатических факторов.

Из 36 ледников, представленных в Каталоге, но не обнаруженных на снимках ASTER, только три внесены в Каталог по результатам обработки аэрофотоснимков. Для определения границ остальных 33 ледников использованы топографические карты, изданные до 1968 г. (год издания 20-го тома Каталога ледников СССР) [3], номенклатуру которых сейчас установить нельзя. Можно, конечно, предположить, что остальные ледники либо растаяли, либо это ошибки дешифрирования снимков. Однако на снимках эта территория свободна от сезонного

снега и облачности, препятствующих дешифрированию ледников, а размеры, указанные в Каталоге, не предполагают возможность их столь быстрого исчезновения под воздействием естественных природных факторов.

Всего из проанализированных ледников Каталога только 56 (из 161) включены в Каталог по результатам обработки аэрофотоснимков 1950 г. Это составляет 34,8% выборки. А из общего числа ледников, представленных в Каталоге на район исследований (197), только 29,9% внесены в Каталог по результатам обработки аэрофотоснимков. Возможно, эти обстоятельства объясняют разницу в числе ледников между данными Каталога ледников СССР и нашего исследования. Скорее всего, это связано с исходными данными, которые использовались при составлении Каталога на данную территорию.

В ряде случаев при сравнении ледников в 2002 г. с Каталогом отмечено увеличение их площадей. Как правило, такие ледники имели размеры менее 1 км<sup>2</sup> и вносились в Каталог с использованием топокарт. Однако в этой группе были и два крупных ледника — Хувхотун и Хайлюлинский (площадь на 2002 г. 25,39 и 14,03 км<sup>2</sup> соответственно). Увеличение их площадей по сравнению с Каталогом (на 4,9 и 3,9% соответственно) можно объяснить особенностями их морфологии. Оба ледника имеют протяжённые ледоразделы с соседними ледниками. Поэтому их границы, частично проходящие по линиям ледоразделов, могут трактоваться неоднозначно. При проведении ледоразделов была использована цифровая модель рельефа ASTER GDEM, но это не исключало несовпадение с Каталогом. Кроме этого, перемётно-долинный ледник Хувхотун имеет сложную форму границ. Подобные особенности характерны и для ряда других ледников этой группы и могли повлиять на результат.

### Заключение

Итак, ледники северной части Срединного хребта Камчатки продолжают сокращаться. С 1950 по 2002 г. площадь ледников уменьшилась на 16,6%, или на 57,7 км<sup>2</sup>. Это сопоставимо с сокращением таких ледниковых систем Северной Евразии, как Алтай, Тянь-Шань или Кавказ, и соответствует изменению основных климатических показателей — повышению

летней температуры воздуха и снижению количества зимних осадков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00242-а).

### Литература

1. Виноградов В.Н., Огородов Н.В. Вулканы и ледники северной части Срединного хребта // Вопросы географии Камчатки. 1966. Вып. 4. С. 70–85.
2. Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н. О климатическом фоне оледенения Камчатки // Гляциологические исследования. 1985. № 27. С. 51–66.
3. Каталог ледников СССР: Т. 20 «Камчатка». Ч. 2–4 / Под ред. В.Н. Виноградова. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 76 с.
4. Кутузов С.С. Изменение площади и объёма ледников хр. Терской Ала-Тоо во второй половине XX в. // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 5–15.
5. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Муравьев А.Я., Нарожный Ю.К., Шахгеданова М.В. Использование исторических данных и современных космических изображений для оценки изменений размеров ледников на Алтае // Лёд и Снег. 2010. № 2 (110). С. 19–24.
6. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 204–210.
7. Отчет Института вулканологии АН СССР «Динамика современного оледенения и взаимодействие с вулканизмом» / Руководитель темы и отв. исполнитель В.Н. Виноградов. Петропавловск-Камчатский, 1982. 333 с.
8. Шмакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лёд и Снег. 2010. № 1 (109). С. 43–57.
9. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model // Journ. of Geophys. Research. 2010. V. 115. D16107; doi:10.1029/2009JD012976

### Summary

The paper examines changes in surface area of glaciers in the north of Middle Ridge (Kamchatka Peninsula) occurred in the 1950s to the present. For this purpose, we used ASTER satellite imageries (2002), data of the USSR Glacier Inventory and aerial photographs of 1950. Vector boundaries of glacier maps were created by the decoding of ASTER images. The received estimates show glaciers decline in this area of Kamchatka. The glacier area of Middle Ridge, presented in the USSR Glacier Inventory, diminished by 16.6%. Reduced glacier area is subject to change major climatic factors. During this period the average summer air temperatures is increasing and the amount of solid precipitation reduced.