Динамика поверхностного слоя льда и выявление границ горных ледников на основе анимаций космических снимков

Dynamics of the Surface Layer of Ice and Identification of Mountain Glaciers Boundaries on the Basis of Animation of Space Photographs

Кобялко / Kobyalko R.
Роман Андреевич
(ramm333@mail.ru)
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
аспирант кафедры криолитологии и гляциологии.
г. Москва

Ключевые слова: Алтай – Altai; деградация ледников – degradation of glaciers; динамика ледников – dynamics of glaciers; космические снимки – satellite images; анимации – animations; ледник – glacier; морена – moraine.

Уровень современного развития сферы дистанционного зондирования предоставляет отличную возможность для подробного и точного изучения динамических характеристик поверхностного слоя льда на ледниках на основе картографических анимаций ряда снимков. В результате удаётся отобразить скорости движения льда, что важно для обоснованного распознавания истинных границ ледника даже при наличии моренного чехла. Анимации вырисовывают наглядную картину динамики ледника и способствуют визуальному выявлению процессов в перигляциальном поясе.

The state-of-the-art of the remote sensing provides an excellent opportunity for detailed and accurate study of dynamic characteristics of the glaciers ice surface layer on the basis of cartographic animations of a number of images. As a result, it is possible to display velocities of ice movement, which is important for validated identification of glacier boundaries even in the presence of the debris mantle. The animations draw in detail a vivid picture of the glacier dynamics and facilitate visual identification of processes in the periglacial girdle.

Введение

Бурное развитие отрасли дистанционного зондирования Земли значительно повысило точность и детальность геоинформационных исследований. Если всего лишь десятилетие назад самыми востребованными являлись снимки с пространственным разрешением 5–50 м/пикс, то сейчас это высокодетальные изображения Земли из космоса разрешением менее 2 м/пикс [1]. Это дает прекрасную возможность выполнять высокоточные работы в ГИС программном обеспечении по измерению скорости и созданию анимации движения поверхностного слоя льда, а впоследствии выявления точных границ ледника, которые в гляциологии традиционно совпадают с нулевыми изотахами течения глетчерного льда.

Конечно, если речь идет об огромных площадях дендритовых ледников, то для общего охвата такая подробная съемка теряет смысл. Здесь будет вполне достаточно снимков *Landsat* (15 м/пикс – *Panchrom*, 30 м/пикс – *Multispectral*). Для изучения большинства ледников горных районов территории России, таких как Кавказ, Алтай и т.п., в связи с их относительно небольшими размерами, вполне целесообразно использовать для подробного изучения динамических процессов серии снимков сверхвысокого разрешения со спутников *SPOT*, *WorldView*, *Terra*, *Ресурс*, *GeoEye*, *QuickBird* и др.

Теоретически, максимальные скорости на леднике наблюдаются чаще выше ледопадов, но ниже фирновой линии [2]. В связи с отсутствием опорных точек в данной области и из-за сильной отражающей способности вышележащего снега и фирна, измерения по спутниковым снимкам затруднены или часто просто невозможны.

Решающим фактором является выбор даты съемки, которую надо стремиться приурочить к моменту максимального высвобождения площади ледника от снега, накопленного за период аккумуляции.

Статья содержит методические и концептуальные положения, которые могут быть применимы при дешифрировании точных границ любых горных ледников в ГИС программах. Это даст возможность уточнить параметры оценки современного оледенения и его водозапаса. В данной работе исследование выполнено на примере алтайских ледников.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) по

проекту 15-05-00599а, а также по программе «Ведущие научные школы России» НШ-335.2014.5.

Методика работы и результаты исследований

Опорными точками на поверхности ледника для измерения скоростей поверхностного слоя льда может являться относительно крупный материал или его скопление в виде срединной морены и/или крупных валунов, движущихся вместе со льдом вниз под действием силы тяжести. В зависимости от разрешения снимка будут изменяться варианты выбора объекта, поэтому чаще всего выделяется скопление моренного материала, хорошо видного даже на снимках 10 м/пикс и мельче. В случае сверхвысокого разрешения можно оценивать скорость движения льда по расстояниям между огивами, но такие наблюдения нередко могут быть весьма неточными в связи с частой аритмичностью возникновения этих элементов ледниковой полосчатости (рис. 1).

На примере оледенения Белухи, высшей точки Центрального Алтая, по ряду космоснимков, представленных с 2006 по 2013 годы, показана возможность выявления скорости движения поверхностно слоя льда. Были использованы изображения со спутников от *SPOT* 2 до *SPOT* 6. Измерения скоростей проводились с помощью программного обеспечения *ArcGIS*.

Скорости движения льда на поверхности замерялись на семи основных потоках: Мушту-айры (рис. 2), Аккемский, Менсу, большой и малый Берельский, Катунский и Чёрный. Измерения выполнялись визуально, на основе опорных точек поверхности. Скорость верхнего слоя льда всех ледников Белухи в среднем составила 25,1 метров в год за период с 2006 по 2013 гг. Средняя скорость отступания концов языков за семилетний период составила 21,9 м/год.

Скорость движения каждого ледника различна и зависит от множества факторов, а также варьирует в рамках одного языка на разных участках. Средняя скорость поверхностного слоя льда на леднике Мушту-айры равна 27,4 м/год. Максимумы зафиксированы на ледопаде и в районе впадения бокового потока с орографически левого борта, где скорости возрастают до 33,8 м/год.

Важным фактором является не только объем льда бокового потока, но и угол входа в основное тело ледника. Так, верхний приток течет под углом 50°. В месте слияния на языке основного потока наблюдается максимальная скорость на языке (рис. 3). Приток, расположенный несколько ниже, хоть и имеет больший объем, но входит под углом 85°, и в данном случае скорость составляет 28,6 м/год (рис. 4). В этой ситуации стоит также учитывать факт замедления течения льда ближе к концу языка: от максимума на ледопаде до минимума на конце – скорость здесь будет различаться на 14,8 м/год в центральном течении. У левого борта в нижнем течении наблюдается минимум, равный всего-навсего 10,3 м/год. Разница скоростей “от центра к бортам” прекрасно видна по характерным С-образным дугам (огивам) на ледниковой поверхности, кривизна которых увеличивается ниже по течению (рис. 2).

На Аккемском леднике была замерена скорость движения вытянутого моренного острова (муравьиной кучи) в нижнем течении. Здесь подтвердился факт замедления льда по направлению к концу ледника. Скорости в нижней и верхней части разнились на 2,8 м/год. Длина моренного вала составляет 685 метров, из чего следует, что коэффициент замедления на этом отрезке равен 0,41 см/год на каждый метр поверхности.

На леднике Менсу замерена скорость движения морены в центральном и боковом течении и подтверждена разница “от центра к бортам”. В центре наблюдается скорость 30,1 м/год, а у борта 23,3 м/год. Похожая ситуация наблюдается и на Малом Берельском леднике, где у борта наблюдается 16,4 м/год, а в центральном течении 28,3 м/год.

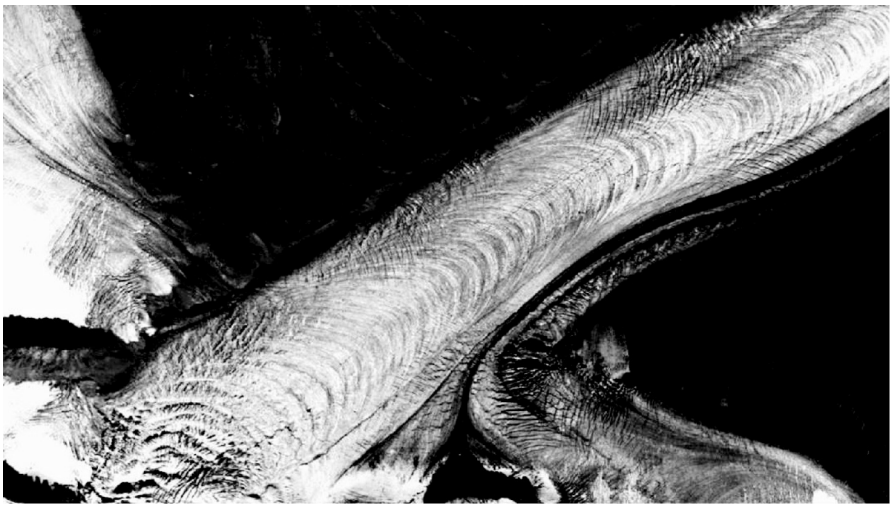

Рис. 1. Огивы на поверхности языка л. Менсу (Центральный Алтай) ниже ледопада (SPOT 6)

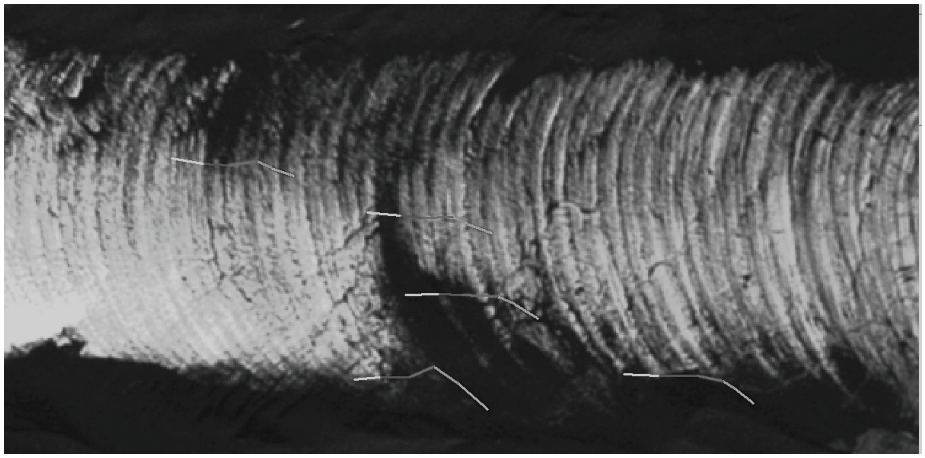

Рис. 2. Траектории движения за 5 лет на участке языка ледника Мушту-айры (Центральный Алтай), ниже ледопада (SPOT 6)

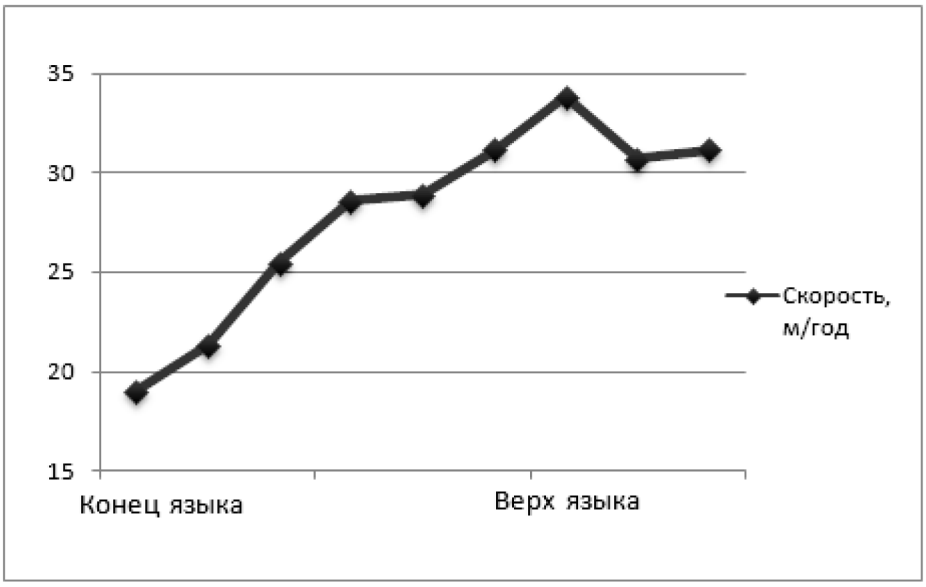

Рис. 3. Распределение средних скоростей по языку ледника Мушту-айры (Центральный Алтай), с пиком в районе впадения бокового потока.

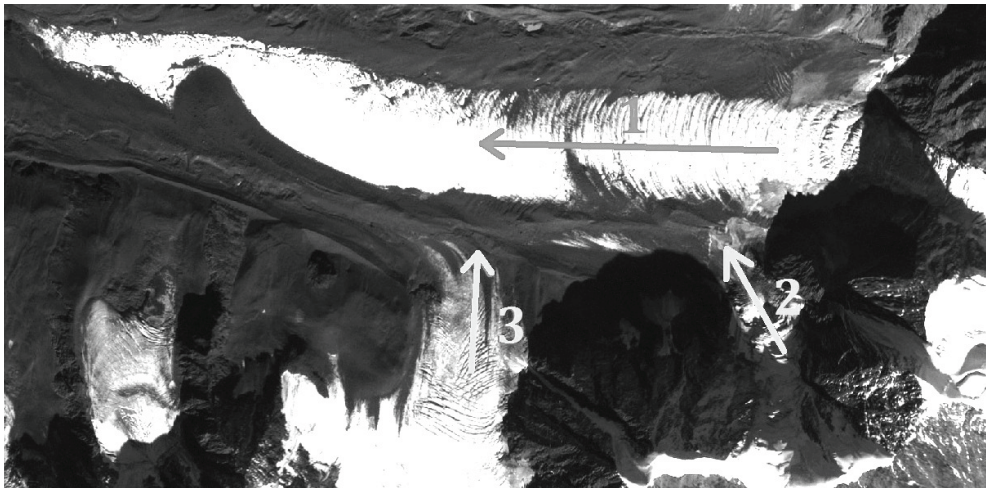

Рис. 4. Язык ледника Мушту-айры (Центральный Алтай). 1 – основной поток, 2 – верхний приток, 3 – нижний приток

Большой Берельский ледник отличается большими скоростями, которые достигают 42,7 м/год. Средняя скорость составила 37,1 м/год. В центральном потоке наблюдаются показатели от 35 до 42 м/год в зависимости от близости к концу ледника, а по бортам скорости варьируют в интервале от 34 до 37 м/год.

Катунский ледник имеет два потока, сливающиеся в один ближе к концу языка. Здесь также наблюдаются различные скорости в силу не столько разницы объемов льда, сколько угла вхождения в единый поток. Орографически правый поток имеет меньший объем льда, но в силу вхождения в общий поток под углом 40°, правая ветвь движется со скоростью 30,1 м/год, а левая с большим объемом льда, но входящая под углом 85°, имеет скорость 28,4 м/год.

И наконец, ледник Черный из-за своего небольшого размера имеет относительно небольшую скорость в центральном течении, равную всего 16,7 м/год.

Стоит отметить, что скорость движения льда изменяется не только "от центра к бортам" и от ледопадов к концу языка, но и в самой ледяной толще. Здесь представлены наибольшие показатели скорости у поверхности и уменьшение вглубь, хотя есть свидетельства о нескольких случаях обратной зависимости, но в данном районе такого зафиксировано не было [2].

При создании анимации впечатление движения при динамическом картографировании возникает на основе смены снимков-кадров, которую можно проводить с различной скоростью, выставляя временной масштаб. Ряд исследователей считает, что серии статичных карт по самой своей сути скрывают от читателя часть информации при отображении динамики объектов, явлений и процессов. Полноценную коммуникацию обеспечивают лишь анимации [3].

При создании анимации очень важно, чтобы космические снимки после ортотрансформации и пространственной привязки очень хорошо совмещались. Для этого нужно выполнять высокоточную привязку по большому количеству точек, т.к. расчлененность рельефа в горах имеет очень высокую степень. Для выполнения данной операции работа проводилась в программном обеспечении *ScanEx Image Processor*.

Для создания анимации и дальнейшего редактирования параметров скорости воспроизведения можно использовать такую программу как *Animator Pro*, но также существуют мобильные варианты для быстрого создания анимационных изображений, с основным минимальным набором настраиваемых параметров, например *Easy GIF Animator*.

При создании анимации важную роль играет временной масштаб, благодаря которому наблюдатель правильно воспримет динамическое изображение. Это должно быть не слишком быстро, но и не слишком медленно. В ходе работы нужно выявить оптимальную скорость, благодаря которой будет наилучшим образом воспринята информация, которую дает это изображение.

На основе созданных анимаций есть возможность очень точно выявлять границу ледника даже при наличии моренного чехла на поверхности, блокирующего идентификацию как по спутниковым снимкам, так и при работе в поле. Но стоит уточнить, что за ледник принимается только лед, который имеет свойство движения, тогда как при рассмотрении ледника с гидрологической точки зрения следует включать также фирново-ледяную облицовку и мертвый лед, т.к. он вносит свою долю в сток данного ледника.

При рассмотрении анимации на отложенной морене будет выявляться небольшое движение даже в радиусе в нескольких сотен метров от тела активного ледника в связи с процессами перераспределения и оседания материала, а также вследствие таяния участков мертвого льда и явлений термокарста.

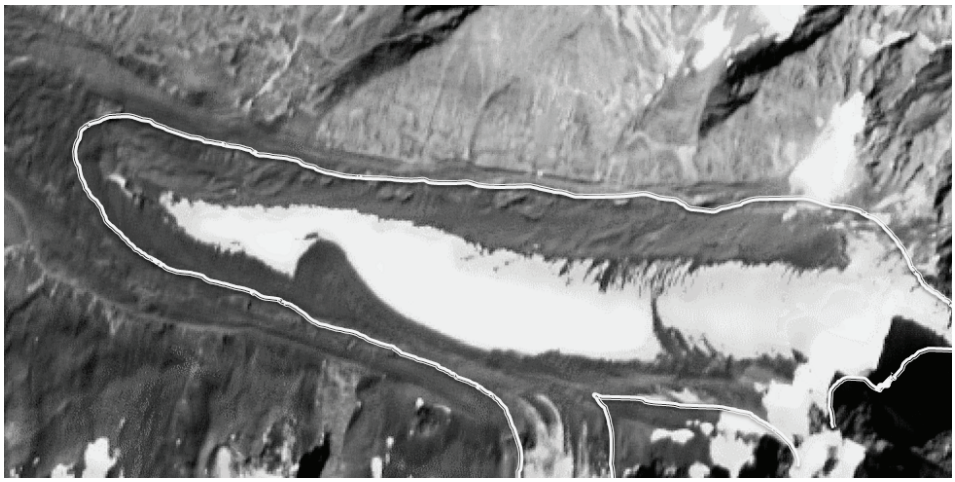

Рис. 5. Выделенная граница ледника Мушту-айры (Центральный Алтай) на основе анимации (SPOT 5)

В результате будет видна разница в скорости перемещения поверхностного слоя льда от центра к бортам и от языка к ледопаду. Несмотря на более низкие скорости движения льда у бортов, она всё же присутствует, вследствие чего удаётся распознать, где находится граница ледника, даже несмотря на присутствие моренного чехла различной толщины.

Заключение

Сегодня для описанных выше методов точного измерения поверхностных скоростей и распознания границ ледников уже накопился достаточный архив снимков сверхвысокого разрешения, на основе которых можно проводить высокоточные дистанционные измерения и создавать анимации с отличным качеством изображения. Высокое качество достигается при условии работы с методами высокоточной привязки и ортотрансформации по ЦМР (цифровой модели рельефа), что в итоге устранит возможные искажения изображения в связи с разным углом съемки со спутника.

Архив доступных коммерческих спутниковых снимков сверхвысокого разрешения начал накапливаться только в новом тысячелетии, что оказалось очень кстати вследствие ускорения тенденции сокращения горных ледников на большей части планеты и в том числе на всей территории России. Такие эволюционные тренды уже выявлены, к примеру, для оледенения Кавказа и Алтая. Данные снимки становятся всё более доступны, благодаря коммерческим организациям, предоставляющим данные научным организациям, порой даже в безвозмездной форме.

На основе анимаций снимков-кадров ледников теперь возможно решить одну из главных проблем, часто фигурирующую в гляциологической литературе, – обоснованное оконтуривание ледника. Сейчас, когда стало возможным выделять границы ледника, несмотря на развитие моренного чехла, можно существенно уточнить размеры ледников при дешифрировании, что повышает коэффициент точности анализа материалов дистанционного зондирования, за которым скорее всего стоит будущее гляциологических работ.

Геоинформационные технологии в совокупности со снимками сверхвысокого разрешения дают всё более близкий к “полевой” точности результат. Такие методы как анимация предоставляют возможности, которые в поле сложно осуществимы и очень трудоемки, а зачастую и вовсе невыполнимы. Уточняя параметры ледников и предоставляя более точную оценку запасам льда, можно уменьшить ошибки прогнозов, например по стоку воды с глетчеров. В горных районах это также очень важно из-за существования пульсирующих ледников и процессов прорыва ледниковых озер. Эти катастрофические явления вызывают селевую опасность и представляют угрозу для поселений, расположенных ниже по долине. Здесь важен аспект мобильности и точности выполнения моделирования хода селевого потока, т.к. при угрозе катастрофы очень важна своевременная система экстренного оповещения и эвакуации населения.

Литература

1. Санюшкин, А. И. Спутники SPOT 6 и SPOT 7 – новый шаг в развитии отрасли ДДЗЗ / А.И. Санюшкин, М.А. Зимин // Земля из Космоса. – 2014. – № 2. – С. 74–84.

2. Калесник, С. В. Очерки гляциологии / С.В. Калесник. – Москва: Географгиз, 1963. – 553 с.

3. Campbell, C. Animated Cartography: Thirty Years of Scratching the Surface / C. Campbell, S. Egbert // Cartographica. – 1990. – P. 24–46.