



Исчезновение высокогорных льдов как фактор гидрологических вызовов глобального и местного масштаба: обзор с примечаниями по Центральной Азии

Вилфрид Хеберли

Географический факультет Цюрихского университета, Швейцария
для корреспонденции: wilfried.haeberli@geo.uzh.ch

IRSTI 37.29.02

doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-2/51-72.rus

Данная версия является переводом статьи «Vanishing high-mountain ice causing hydrological challenges at global to local scales: An overview with notes on Central Asia», опубликованной в журнале 10 декабря 2019 г.

Аннотация

Ледники и зоны вечной мерзлоты остро реагируют на повышение температуры атмосферы. Вследствие него среднеширотные ледяные высокогорные экосистемы, в том числе на территории горных хребтов Центральной Азии, претерпевают резкие изменения. Продолжение этих изменений, по крайней мере, частично, следует рассматривать как неизбежное, а соответствующие последствия для водного цикла будут ощущаться далеко не одним поколением в будущем. Основные гидрологические вызовы связаны с повышением уровня мирового океана (глобальный масштаб), водоснабжением за счет речного стока (от континентального вплоть до регионального масштаба) и формированием новых озер с соответствующими возможностями в сферах гидроэнергетики, водного хозяйства и туризма, которые несут с собой риски, связанные с волновой нагрузкой и паводковыми волнами (от регионального вплоть до местного масштаба). Международное научное сотрудничество, применение новых технологий ведения наблюдений и расширение возможностей моделирования в сочетании с комплексным системным анализом могут позволить сформировать информационную базу для коллективного (партисипативного) планирования, а также для поиска интегративных решений в рамках адаптационных стратегий. Замедление глобального потепления благодаря сокращению выбросов парниковых газов поможет выиграть время для решения этой сложной задачи. Настоящая статья основана на материалах одного из основных докладов на Международном симпозиуме по водным и земельным ресурсам в Центральной Азии (CAWa) в 2018 году. В свете создания необходимой информационной базы в статье также делается обзор современной международной тематической литературы, включая по ряду аспектов, связанных с Центральной Азией.

Ключевые слова: ледники, вечная мерзлота, водные ресурсы, изменение климата, высокогорье.

Тип статьи: обзорная статья.

1. Введение

Самые большие многолетние ледяные массы в высокогорьях существуют в виде поверхностного льда (ледники) и подповерхностного льда (вечная мерзлота). Эти ледяные массы подвергаются воздействию быстрого глобального потепления со скоростью, которая в высокогорьях значительно превышает среднее глобальное потепление (зависящее от высоты) (MRI, 2015). Продолжение такого повышения атмосферной температуры приводит к тому, что компоненты льда уменьшаются и даже исчезают во многих местах и в течение длительных периодов времени. Поскольку эти ледяные массы являются частью круговорота воды, их сокращение и потенциальное исчезновение имеет гидрологические последствия далеко за пределами высокогорий. Понимание, прогнозирование и преодоление таких гидрологических последствий представляет собой научные, а также политические и социально-экономические проблемы с учетом условий жизни человека в глобальном, континентальном, региональном и местном масштабах.

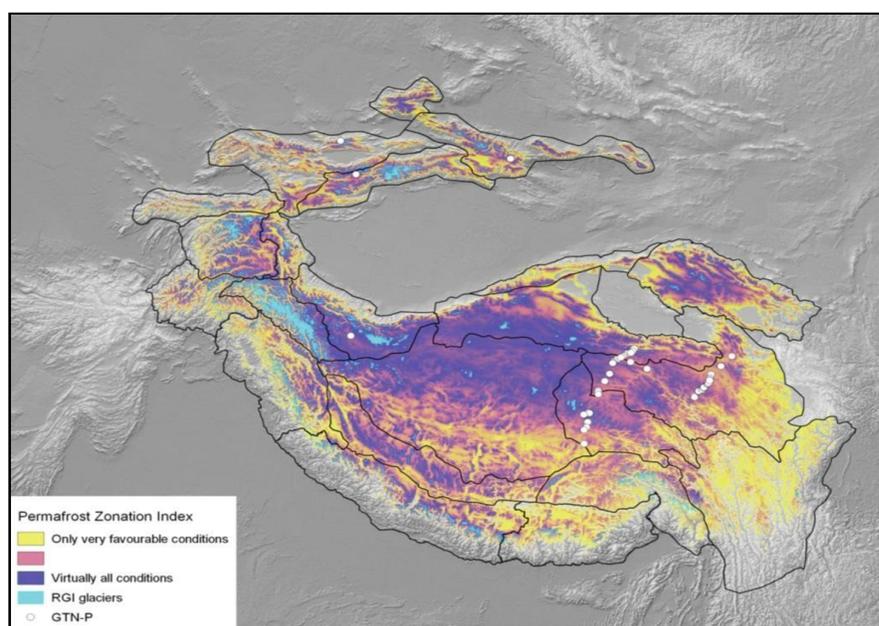


Рис. 1. Ледники и вечная мерзлота в расширенном регионе Гималаев Гиндукуше (Bolch et al., 2019).

Следующий краткий обзор создан на основе презентации Международного симпозиума по водным и земельным ресурсам в Центральной Азии (CAWa), проходившем в Алматы 9–11 октября 2018 г. Он начинается с краткого изложения документированных текущих изменений ледников и вечной мерзлоты, а затем

фокусируется на недавних на-учных исследованиях, касающихся глобального уровня моря, континентального и регио-нального водоснабжения за счет речного стока, а также региональных и местных рисков и возможностей, связанных с образованием новых озер в дегляцирующих горных регионах. Представлены краткие комментарии по конкретным аспектам, связанным с высокогорьем Центральной Азии (см. подробную информацию в Hoelzle et al., 2019). Цель состоит в том, чтобы направить широкую меж и трансдисциплинарную аудиторию от глобальной перспективы к более конкретным региональным аспектам. Huggel et al. (2015) и совсем недавно IPCC SROCC (2019) предоставляют всеобъемлющую информацию по теме изменения горной криосферы.

2. Ледники и вечная мерзлота в высокогорных районах

Как ледники, так и вечная мерзлота как формы многолетнего поверхностного/подповерхностного льда сильно реагируют на последствия изменения климата и поэтому являются основными климатическими переменными (ECV), мониторинг которых осуществляется в рамках Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК) в поддержку Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН). В сухо-континентальных условиях, характерных для высокогорий Центральной Азии, политермальные и холодные ледники встречаются на высотах с низкими среднегодовыми температурами воздуха, а перигляциальная вечная мерзлота может быть широко распространена и богата льдом (рис. 1).

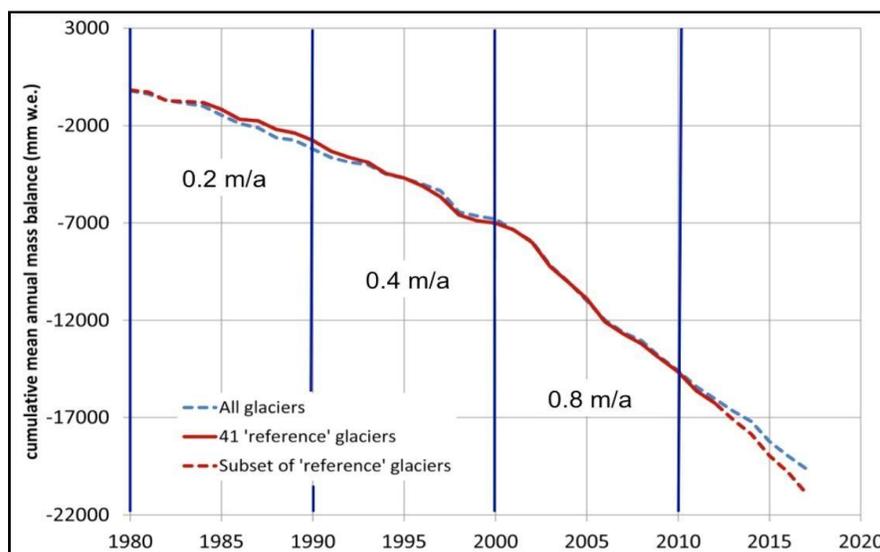


Рис. 2. Кумулятивные балансы массы (выраженные как средняя потеря толщины в водном эквиваленте) ледников во всем мире с длительными/непрерывными наблюдениями (“эталонные ледники” – красная линия) и приблизительными десятилетними средними значениями, в м/год. Данные Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS; подробнее см. <https://wgms.ch/>).

Хорошо видимые и зачастую впечатляющие фирн и лед горных ледников имеют давние традиции в научных исследованиях, экономике и культуре. Вследствие этого существует богатая количественная информация. Глобальная наземная сеть ледников (GTN-G) как часть Глобальной системы наблюдений за климатом и суши (GTOS/GCOS) находится под совместным управлением Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS), Национального центра данных о снеге и льде США (NSIDC) и инициативы “Глобальные измерения наземного льда из космоса” (GLIMS). Данные инвентаризации ледников (RGI Consortium, 2017) документально подтверждают, что наибольшая концентрация среднеширотных горных ледников находится в Азии. Долгосрочные наблюдения за балансом массы показывают сильные и даже ускоряющиеся потери массы (рис. 2). Zemp et al. (2015) отмечают, что “темпы потери массы в начале XXI века исторически беспрецедентны в глобальном масштабе и в основном обусловлены процессами абляции”. Как, вероятно, и в большинстве ледниковых регионов мира – за поразительным исключением в Каракорумском и Памирском хребтах, где ледники остаются близкими к долгосрочным устойчивым условиям (Kääb et al., 2015; см. Treichler et al., 2019), – сильные потери массы ледников в Высокогорной Азии сопровождаются заметной тенденцией замедления скорости потока (Dehecq et al., 2018).



Рис. 3. Холодный политермальный ледник Туюксу (Тянь-Шань, вверху в центре) в июле 2017 года. Только небольшие участки снега и фирна остаются в самых высоких частях ледника с его языком что свидетельствует о том, что потери льда значительно превышают образование нового льда за счет отложения снега и снежно-фирнового льда. Большие части оставшегося ледника не могут сохраниться в таких условиях (Google Earth).

Ледники в Центральной Азии следуют этой общей тенденции (Farinotti et al., 2015; WGMS, 2017), причем особенно высокие темпы потерь наблюдаются в Восточном Тянь-Шане и Джунгарском Алатау (Hoelzle et al., 2019). После довольно продолжительного перерыва постсоветского периода некоторые долгосрочные наблюдения пришлось возобновить в рамках совместных международных усилий (Hoelzle et al., 2017; Hoelzle et al., 2019). Многие горные ледники, включая ледники Тянь-Шаня (рис. 3), утратили значительную часть своей площади накопления и в настоящее время находятся далеко от равновесия. Это означает, что существуют большие зафиксированные потери массы, то есть что тенденции к сокращению будут продолжаться в течение некоторого времени даже в маловероятном случае отсутствия дальнейшего потепления атмосферы (Mernild et al., 2013). Расчеты численного моделирования показывают, что влияние на эволюцию ледников от переменных сценариев изменения климата начинает заметно различаться только во второй половине XXI века (см. Zekollari et al., 2018, для Европейских Альп). “В значительной степени будущую потерю массы ледника следует считать неизбежной, что делает обязательными определение и выполнение соответствующих адаптационных мер” (Marzeion et al., 2018).

Систематические исследования горной вечной мерзлоты, то есть льда в многолетне-мерзлых грунтах, скрытых под поверхностью, начались только во второй половине XX века (Haerberli et al., 2010) и до сих пор часто недооцениваются, а то и вовсе игнорируются. Глобальная наземная сеть по вечной мерзлоте (GTN-P в рамках GTOS/GCOS) была разработана Международной ассоциацией по вечной мерзлоте (IPA). Смоделированные всемирные обзоры залегания вечной мерзлоты с пространственным разрешением около 1 км² были предоставлены Gruber (2012) и Obu et al. (2019). Наибольшая концентрация высокогорной вечной мерзлоты наблюдается в Азии, где площади многолетнемерзлых пород местами могут значительно превышать площади ледников (Gruber et al., 2017), что иллюстрирует важность подповерхностного льда. Богатые льдом многолетнемерзлые обломки обычно содержат большое количество избыточного льда (содержание льда > пористость материала), который вызывает когезию и в то же время уменьшает внутреннее трение в изначально бескогезионных материалах с высоким внутренним трением (осыпи, обломки, морены, оползневые отложения и т. д.). Как следствие, такие ледово-каменные смеси подвергаются длительной кумулятивной деформации за счет вязкой ползучести (Haerberli et al., 2006). Соответствующие формы рельефа часто имеют среднее содержание льда более 50 % по объему и могут иметь возраст в тысячи лет (Krainer et al., 2014).

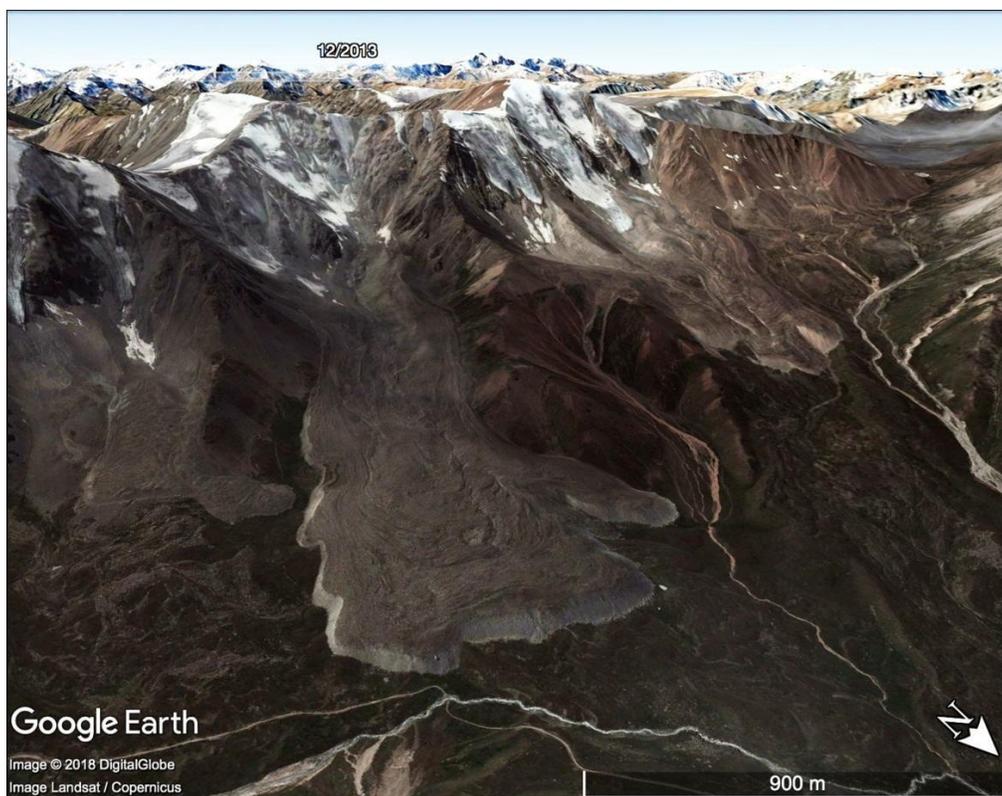


Рис. 4. Долговременная когезионно-вязкая деформация многолетнемерзлых обломков, богатых льдом: ледник Моренный (центр) и другие связанные с вечной мерзлотой особенности ползучести (скальные ледники) в Центральном Тянь-Шане (Google Earth).

В разительном контрасте с заметной потерей толщины (обычно дециметры в год) и замедлением большинства ледников богатые льдом массы многолетнемерзлых обломков сначала имеют тенденцию к нагреванию, увеличению содержания незамерзшей воды и тем самым ускорению их ползучего движения и перемещения (Roer et al., 2008; Darrow et al., 2016; Eriksen et al., 2018), в то время как общие темпы таяния (обычно сантиметры в год или даже меньше) остаются медленными. В Тянь-Шане интенсивно изучались крупные скальные ледники (рис. 4) в местах сложных взаимодействий с политермическим и холодным поверхностным льдом (многолетние ледяные пятна, малые ледники) (Bolch and Gorbunov, 2014; Bolch et al., 2018).

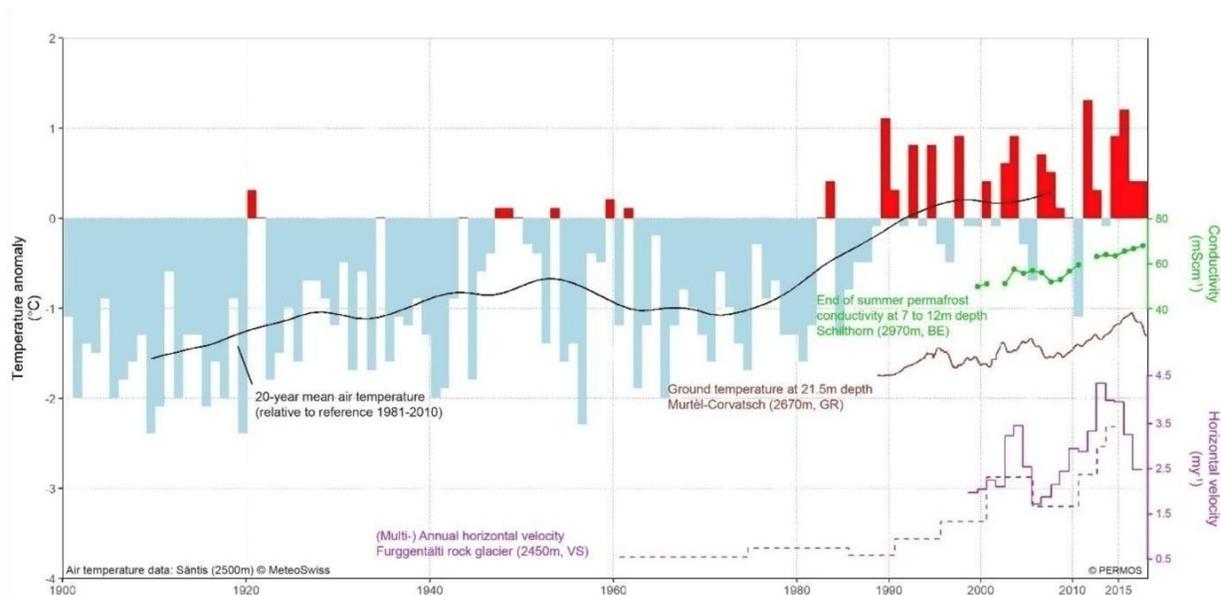


Рис. 5. Мониторинг горной вечной мерзлоты – пример Швейцарских Альп, где ведется сбор всесторонней информации: изменение температуры воздуха, удельного электрического сопротивления, температуры скважины и движения скальных ледников. Изменения удельного электрического сопротивления указывают на изменение содержания незамерзшей воды в замороженных материалах (Швейцарская сеть мониторинга вечной мерзлоты PERMOS и Mollaret et al., 2018).

Долгосрочный мониторинг горной вечной мерзлоты показывает тенденции повышения температуры скважины (Biskaborn et al., 2019), причем температура в холодной вечной мерзлоте растет быстрее, чем в вечной мерзлоте вблизи таяния – условия для льда, где эффекты скрытого теплообмена становятся все более важными. Такие тенденции зафиксированы и для Центральной Азии (Marchenko et al., 2007; Zhao et al., 2008; Hoelzle, 2019). Во всем мире общий объем, содержащийся в настоящее время в многолетнемерзлых горах, по оценкам, примерно на два-три порядка меньше объема льда, содержащегося в еще существующих горных ледниках (Jones et al., 2018). Однако можно ожидать, что это соотношение будет быстро меняться по мере быстрого сокращения горных ледников и медленного оттаивания глубоко промерзшего грунта. Расчеты численной модели (Noetzli and Gruber, 2009) действительно показывают, что деградация вечной мерзлоты и таяние ледяных горных вершин происходит гораздо менее быстро, чем таяние ледников. Это связано с медленным процессом диффузии тепла на глубине, часто усиленным процессами скрытого теплообмена на глубине. В результате вечная мерзлота во многих регионах, вероятно, будет продолжать существовать даже несмотря на то, что она находится далеко за пределами теплового равновесия, когда местные ледники, возможно, уже давно исчезли (Haerberli et al., 2017).

Мониторинг вечной мерзлоты в Центральной Азии может и должен быть усилен с использованием современных технологий, таких как сочетание дистанционного

зондирования (беспилотная фотограмметрия, лазерная альтиметрия, InSAR) для определения движения, перемещения скальных ледников и оседания при морозном оттаивании с мини-регистраторами поверхностных температурных наблюдений и долгосрочных геофизических/скважинных измерений температуры (см., например, Mollaret et al., 2018).

3. Гидрологические проблемы в глобальном и местном масштабах

Сокращение и даже исчезновение горных льдов влияет на водный цикл и вызывает проблемы, связанные с управлением водными ресурсами и уменьшением риска бедствий в глобальном, континентальном, региональном и местном масштабах.

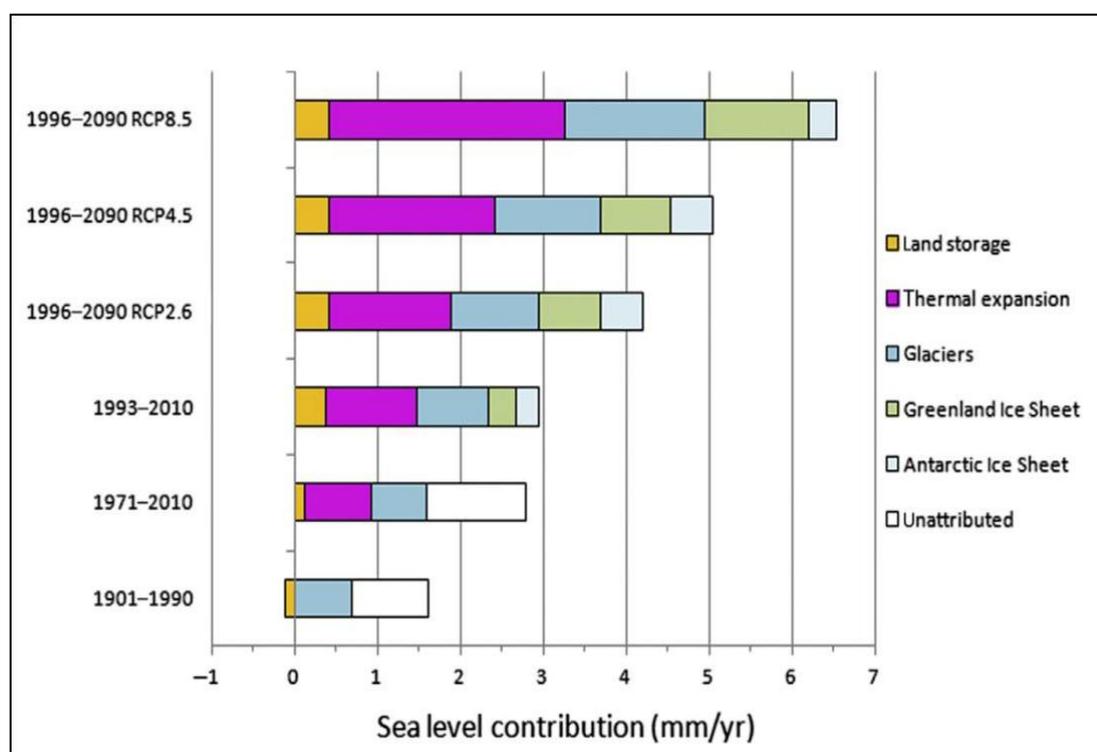


Рис. 6. Факторы изменения уровня моря для различных временных интервалов и климатических сценариев (см. пояснения в тексте; Allison et al., 2015)

В глобальном масштабе уровень моря в настоящее время повышается со скоростью около 3 мм/год и в будущем будет представлять серьезную проблему для человеческой цивилизации (Allison et al., 2015). Современные альтиметрические и гравитационные спутниковые наблюдения позволяют закрыть объем уровня моря за последние примерно два десятилетия (WCRP, 2018): средний глобальный уровень моря, зафиксированный с помощью альтиметрии, в значительной степени объясняется

суммой теплового расширения океана и увеличения массы океана за счет сокращения сухопутного льда, по данным Эксперимента восстановления гравитации и климата (GRACE). Часть остатков может относиться к компоненту наземного хранения, тогда как можно предположить, что поступление воды в океан в результате эксплуатации подземных вод все больше преобладает над хранением воды в водохранилищах (Ablain et al., 2017). Основной вклад наземного льда (рис. 6) связан с потерей льда ледниками и континентальными ледяными щитами Антарктиды и Гренландии. Вместе они составляют примерно половину от общего объема. Однако не каждый кусок льда из исчезающих ледников способствует повышению уровня моря. По оценкам, 10–15 % все еще существующего льда в приливных ледниках уже находится ниже уровня моря (Haeberli and Linsbauer, 2013; см. Huss and Hock, 2015; Farinotti et al., 2019a), и часть ледниковой талой воды может не достигать океана, а испаряться по систематически удлиняющимся путям в океан или удерживаться в более углубленных частях ложа ледника, а впоследствии при отступлении ледников стать озерами или грунтовыми водоносными поймами (Marzeion et al., 2016). Последний эффект особенно выражен в Гималайско-Каракорумском регионе, где может появиться большое количество новых озер/пойм (Linsbauer et al., 2016). Особенно в Азии значительные объемы талых ледниковых вод не достигают океана, а заканчиваются в эндорейных бассейнах (Huss et al., 2017). В течение 2010–2100 гг. и в зависимости от климатических сценариев (Репрезентативные пути концентрации – RCP 2.6 и 8.5) (IPCC, 2014) ледники в Центральной Азии, по оценкам, внесут около 5–10 мм эквивалента уровня моря и потеряют от 50 до 90 % своего объема (Huss and Hock, 2015). Общий объем подповерхностного льда в вечной мерзлоте Центральной Азии остается неизвестным. По приблизительным оценкам, он может быть явно меньше, чем объем оставшихся сегодня ледников, но тем не менее, возможно, примерно на тот же порядок. Его почти полная потеря займет не десятилетия, а столетия, если не тысячелетия.

На континентальном и региональном уровнях основные гидрологические проблемы связаны с вопросами изменения водоснабжения за счет сброса рек с гор со снегом и льдом. Такие проблемы особенно серьезны там, где сельское хозяйство зависит от оросительной воды и где теплое время года соответствует сухому. Таким образом, зависимость человека от таяния ледников напрямую не связана с высокой плотностью населения (Kaser et al., 2010).

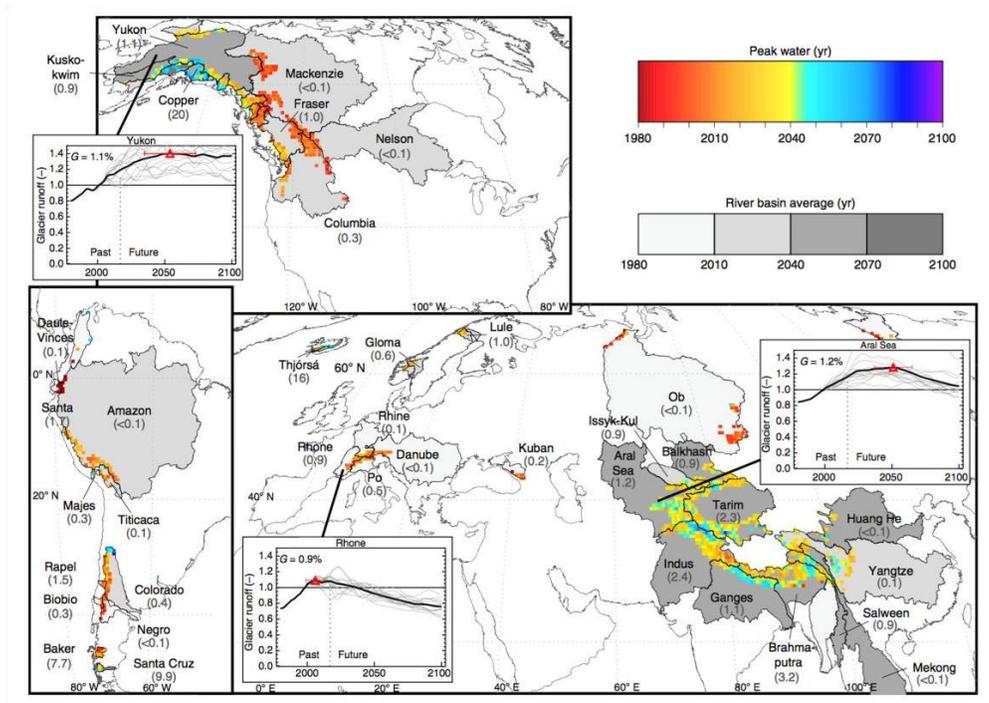


Рис. 7. Время пика воды из покрытых ледниками гор в условиях глобального потепления (Huss and Hock, 2018). Воспроизведено с разрешения Nature Climate Change.

Таким образом, происходит важный сезонный сдвиг водных ресурсов с лета на весну, что неблагоприятно сказывается на сельском хозяйстве и ирригации в низменных районах (Hagg et al., 2013). Эволюция состояния снега играет важную роль и может быть задокументирована/реконструирована с использованием комбинации исторических измерений на месте и методов дистанционного зондирования (Gafurov et al., 2015). Наблюдается постоянный сдвиг в сторону более раннего таяния снега, что, как правило, увеличивает нагрузку на доступность пресной воды в период ранней вегетации (Dietz et al., 2014), но тенденции на более низких и больших высотах могут отличаться (Peters et al., 2015). Вода из медленно тающего подповерхностного льда в районах вечной мерзлоты, вероятно, будет продолжать поступать в течение длительных будущих периодов времени (см. Jones et al., 2018). Это явление требует интенсивных научных исследований. На самом деле будущие гидрологические изменения имеют жизненно важное значение для управления водными ресурсами в Центральной Азии и должны основываться на обоснованных исследованиях атрибуции, связывающих наблюдаемые гидрологические изменения в отдельных водосборах с конкретными процессами, управляемыми климатическими и криосферными изменениями (Unger-Shayesteh et al., 2013).

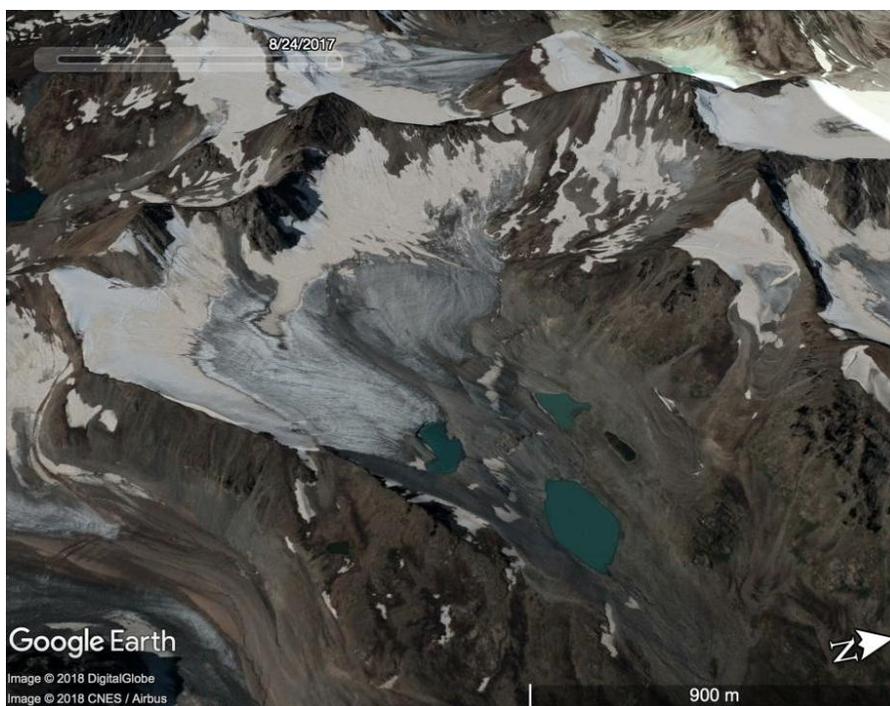


Рис. 8. Новые озера, образующиеся в результате отступления ледников, здесь в богатой обломками среде с политермальными до холодных ледников, окруженных перигляциальной зоной вечной мерзлоты (Тянь-Шань) (Google Earth).

Там, где ледники отступают или даже исчезают, в локальных масштабах образуются новые озера (рис. 8), создавая новые возможности и риски с последствиями на местном и региональном уровнях. Варианты связаны с производством гидроэнергии, водоснабжением, защитой от наводнений и разнообразием ландшафтов / туризмом, в то время как риски вызваны потенциальными прорывами озер (Haeberli et al., 2016). Образование новых озер действительно может выступать в качестве мультипликатора рисков, поскольку оно сильно расширяет потенциальные зоны опасности наводнений, часто в населенных районах, ранее считавшихся безопасными (Haeberli et al., 2001; Carey et al., 2012). При продолжающемся отступлении ледяных полей вверх по долине новые озера формируются все ближе и ближе к чрезмерно крутым склонам окружающих ледяных вершин, где ледниковое разрушение и деградация вечной мерзлоты имеют тенденцию систематически снижать устойчивость склонов в течение длительных будущих периодов времени (Krautblatter et al., 2013; Deline et al., 2015). Вероятность схода крупных ледово-каменных лавин в озера, создающих разрушительные волны наводнений и зачастую крупные селевые потоки, не поддается количественной оценке, но систематически возрастает по мере образования дополнительных озер и продолжающейся вызванной потеплением дестабилизацией ледяных пиков (Haeberli et al., 2017). Возникающие в результате риски могут

значительно превышать исторически известные события, поэтому вовлеченные цепочки процессов должны быть смоделированы с помощью соответствующих модельных цепочек (Schneider et al., 2014; Worni et al., 2014; Somos-Valenzuela et al., 2016).

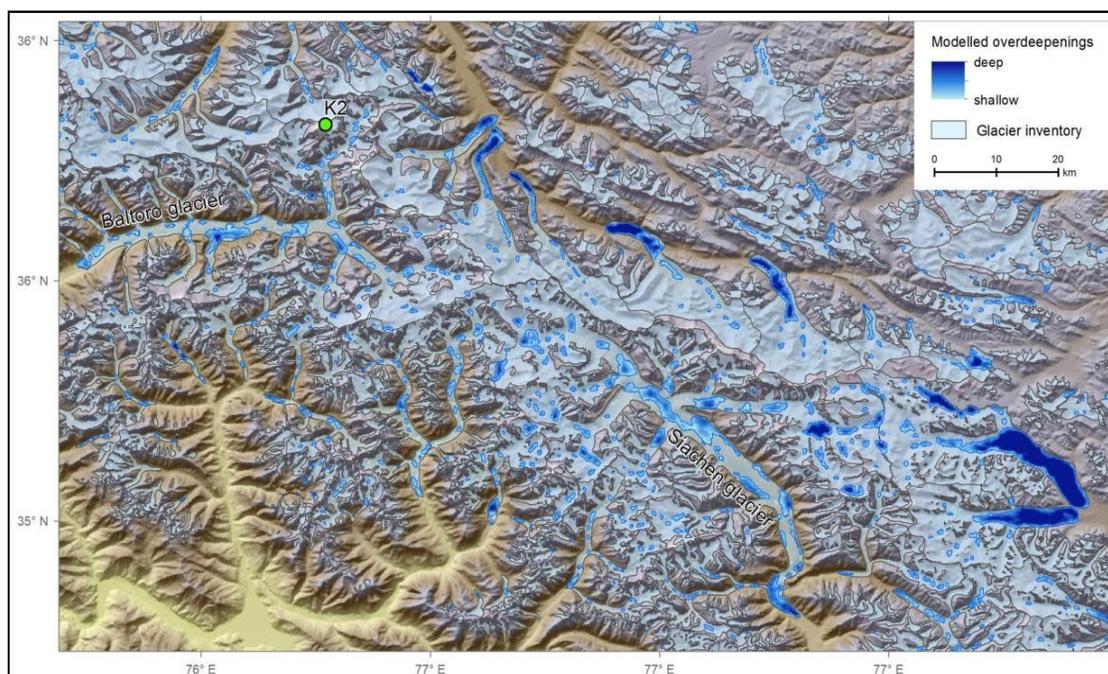


Рис. 9. Смоделированные углубления ледникового ложа как места потенциального образования будущих озер в Гималайско-Каракорумском регионе (Linsbauer et al., 2016)

Моделирование рельефа ложа под все еще существующими ледниками позволяет создавать цифровые модели рельефа “без ледников” в качестве потенциальных будущих топографических поверхностей и оценивать ледниково-углубленные участки, где могут образоваться будущие озера (рис. 9) (Linsbauer et al., 2016; Colonia et al., 2017; Magnin et al., 2019). Проблемы с крупными селевыми потоками при прорывах озер в горах Центральной Азии известны из прошлого, в частности, в 1956 г. на реке Малая Алматинка (Yafyazova, 2011). Недавний анализ потенциально опасных прогляциальных и перигляциальных озер был представлен Falatkova et al. (2019) и Zaginaev et al. (2019). Первая попытка моделирования потенциальных будущих озер в Джунгарском Алатау была предпринята Kapitsa et al. (2017). Подобная работа должна быть распространена и на другие регионы Центральной Азии, включая моделирование технологических цепочек для оценки опасности и рисков.

4. Перспективы и рекомендации

Будущее ледяных гор во всем мире будет связано с быстро меняющимися экологическими условиями с далеко идущими последствиями. Уже сейчас эти изменения, по крайней мере частично, неизбежны и будут необратимыми для грядущих поколений. Необходимо своевременно создать соответствующую базу научных знаний в качестве инструмента планирования для разработки адекватных и политически приемлемых стратегий адаптации (McDowell et al., 2019). Как видно из современной научной литературы, ключевым элементом решения этой задачи является международное сотрудничество. Более того, новые технологии открывают путь к значительному улучшению информации о текущих изменениях и реалистичных сценариях возможного будущего развития. Примеры таковы:

- InSAR и альтиметрические наблюдения за изменениями ледников и вечной мерзлоты в отдаленных регионах;
- небольшие пункты регистрации данных или геофизического мониторинга для обнаружения изменений в подповерхностных тепловых и ледовых условиях;
- моделирование рассредоточенной толщины ледников для прогнозирования будущих рельефов поверхности “без ледников”.

Последнее служит основой для моделирования будущих ландшафтов в регионах с дегляциацией и соответствующих сложных/взаимосвязанных систем, процессов и взаимодействий в условиях значительного дисбаланса, особенно в отношении устойчивости склонов, эволюции озер, каскадов отложений и характеристик экосистем. Таким образом, для понимания соответствующих ге- и экосистемных характеристик с целью поиска устойчивых решений требуется комплексный анализ. Примерами в этой новой области исследований являются:

- современные интегративные и сценарные оценки опасности в ледяных горах (GARHAZ, 2017);
- гидросоциальное моделирование, включающее как спрос, так и предложение воды на нее в условиях повышения атмосферной температуры и социальных изменений (Carey et al., 2013);
- анализ снижения рисков, связанных с новыми озерами, с учетом факторов опасности внезапных наводнений, а также с потенциальными засухами в нижележащей долине (Drenkhan et al., 2019); или
- учет совместных интересов туризма, гидроэнергетики, водоснабжения, сдерживания наводнений и защиты ландшафта при совместном планировании многоцелевых проектов (Haerberli et al., 2016).

Не следует недооценивать сложность таких задач. Основные вопросы, подлежащие рассмотрению, включают сложные этапы междисциплинарных исследований, касающихся системного знания, целевого знания и трансформационного знания (Pohl and Hirsch Hadorn, 2007). Системные знания – чего мы ожидаем? – о гидрологических проблемах, вызванных исчезновением

высокогорных льдов, как изложено в данном материале, являются научной задачей. Соответствующие знания и исследовательский потенциал, касающиеся быстрых и необратимых изменений в сложных, сильно взаимосвязанных системах, необходимо поддерживать в рабочем состоянии на протяжении последующих поколений. Например, возможности развития гидроэнергетики (Farinotti et al., 2019b) в дегляцирующих холодных горах с деградирующей вечной мерзлотой должны быть не только тщательно продуманы с учетом других интересов, таких как туризм, водоснабжение или сохранение ландшафта, но и должны учитывать опасности, связанные с долгосрочной дестабилизацией склонов (Haeberli et al., 2016). Передовые системные знания должны стать основой для развития и согласования целевых знаний – чего мы хотим? Этот шаг лучше всего осуществлять в форме партисипативного планирования с привлечением заинтересованных сторон с целью поиска политически приемлемых и устойчивых решений. Это требует особых усилий в тех случаях, когда речь идет о транснациональных аспектах. Крупные инвестиции, например, в связи с инженерными сооружениями, такими как установки для сдерживания паводков с целью снижения рисков от опасных новых озер, нуждаются в международной поддержке; они наиболее реалистичны в финансовом и политическом плане в рамках многоцелевого использования (Haeberli et al., 2016). Наконец, пути принятия решений – что мы можем/должны сделать, как мы должны действовать? – могут быть сложными и отнимать много времени. Время действительно является ключевым фактором: ожидаемое ускорение необратимых системных изменений все больше сокращает время для размышлений и степени свободы в политических процедурах и стратегиях. Поэтому замедление тенденций потепления посредством международных усилий по сокращению выбросов парниковых газов будет иметь важное значение для ограничения негативных последствий в высокогорных регионах и прилегающих к ним низменностях, а также для обеспечения необходимого времени для успешной и устойчивой адаптации.

5. Благодарности

Выражаю благодарность организаторам конференции в Алматы за приглашение выступить с докладом и за содействие в публикации итоговой статьи. Два анонимных рецензента предоставили конструктивные замечания и рекомендации.

6. Список литературы

1. Ablain, M., Legeais, J.F., Prandi, P., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H.B., Benveniste, J. and Cazenave, A., 2017. Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales. *Surveys in Geophysics*, Vol. 38, pp. 7-31. Available at: <http://doi.org/10.1007/s10712-016-9389-8>.

2. Allison, I., Colgan, W., King, M. and Paul, F., 2015. Ice Sheets, Glaciers, and Sea Level. . In: Haeberli, W. and Whiteman, C. (eds.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*, Elsevier, pp. 713-747.
3. Biskaborn, B.K. and 47 co-authors, 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, Vol. 10, No. 264. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>.
4. Bolch, T. and Gorbunov, A.P., 2014. Characteristics and Origin of Rock Glaciers in Northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan). *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 25, pp. 320–332. Available at: <http://doi.org/10.1002/ppp.1825>.
5. Bolch, T., Rohrbach, N., Kutiusov, S., Robson, B.A. and Osmonov, A., 2018. Occurrence, evolution and ice content of ice-debris complexes in the Ak-Shiirak, Central Tien Shan revealed by geophysical and remotely-sensed investigations. *Earth Surface Processes and Landforms*. Available at: <http://doi.org/10.1002/esp.4487>.
6. Bolch, T., Shea, J.M., Liu, S., Azam, F., Gao, Y., Gruber, S., Immerzehl, W.W., Kulkarni, A., Li, H., Tahir, A.A., Zhang, G., Zhang, Y., Bannerjee, A., Berthier, E., Brun, F., Kääb, A., Kraaijenbrink, A., Moholdt, G., Nicholson, L., Pepin, N. and Racoviteanu, A., 2019. Status and Change of the Cryosphere in the Extended Hindu Kush Himalaya Region. In: Wester, P., Mishra, A., Mukerji, A. and Shresta, A.B. (eds.): *The Hindu Kush Himalaya Assessment - Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. ICIMOD, HIMAP, Springer Open, 627p. Available at: http://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_7.
7. Carey, M., Baraer, M., Mark, B., French, A., Bury, J., Young, K.R. and McKenzie, J.M., 2013. Toward hydro-social modeling: Merging human variables and the social sciences with climate-glacier runoff models (Santa River, Peru). *Journal of Hydrology*, Vol. 518 (A), pp. 60-70. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.006>.
8. Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haeberli, W., 2012. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, Vol. 112, No. 3, pp. 733-767. Available at: <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8>.
9. Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C. and Cochachin, A., 2017. Compiling an inventory of glacier-bed overdeepenings and potential new lakes in de-glaciating areas of the Peruvian Andes: Approach, first results, and perspectives for adaptation to climate change. *Water*, Vol. 9, No. 336. Available at: <http://doi.org/10.3390/w9050336>.
10. Darrow, M.M., Gyswyt, N.L., Simpson, J.M., Daanen, R.P. and Hubbard, T.D., 2016. Frozen debris lobe morphology and movement: an overview of eight dynamic features, southern Brooks Range, Alaska. *The Cryosphere*, Vol. 10, pp. 977–993. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-10-977-2016>.
11. Dehecq, A., Gourmelen, N., Gardner, A.S., Brun, F., Goldberg, D., Nienow, P.W., Berthier, E., Vincent, E., Wagnon, P. and Trouvé, E., 2018. Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia. *Nature Geoscience*. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41561-018-0271-9>.

12. Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M., Krautblatter, M., Magnin, F., Mccoll, S., Ravanel, L. and Schoeneich, P., 2015. Ice loss and slope stability in high-mountain regions. In: W. Haeberli, C. Whiteman eds.: *Snow and Ice- related Hazards, Risks and Disasters*, Elsevier, Amsterdam etc., pp. 521-561.
13. Dietz, A.J., Conrad, C., Kuenzer, C., Gesell, G. and Dech, S., 2014. Identifying Changing Snow Cover Characteristics in Central Asia between 1986 and 2014 from Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, Vol. 6, pp. 12752-12775. Available at: <http://doi.org/10.3390/rs61212752>.
14. Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L. and Haeberli, W., 2019. Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: the example of the Vilcanota-Urubamba basin. *Science of the Total Environment*, Vol. 665, pp. 465-483. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>.
15. Duethmann, D., Bolch, T., Farinotti, D., Kriegel, D., Vorogushyn, S., Merz, B., Pieczonka, T., Jiang, T., Su, B. and Güntner, A., 2015. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia. *Water Resources Research*, Vol. 51, pp. 4727–4750. Available at: <http://doi.org/10.1002/2014WR016716>.
16. Eriksen, H. Ø., Rouyet, L., Lauknes, T.R., Berthling, I., Isaksen, K., Hindberg, H., Larsen, Y. and Corner, D.G., 2018. Recent acceleration of a rock glacier complex, Ádjet, Norway, documented by 62 years of remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 45. Available at: <http://doi.org/10.1029/2018GL077605>.
17. Falatkova, K., Šobr, M., Neureiter, A., Šöner, W., Jansky, B., Häusler, H., Engel, Z. and Beneš, V., 2019. Development of proglacial glacial lakes and evaluation of related outburst susceptibility at the Adygin ice-debris complex, northern Tien Shan. *Earth Surface Dynamics*, Vol. 7, pp. 301-320. Available at: <http://doi.org/10.5194/esurf-7-301-2019>.
18. Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J.J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F. and Pandit, A., 2019a. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, Vol. 12, pp. 168–173. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>.
19. Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., Vorogushyn, S. and Güntner, A., 2015. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, Vol. 8, pp. 716-723. Available at: <http://doi.org/10.1038/NGEO2513>.
20. Farinotti, D., Round, V., Huss, M., Compagno, L. and Zekollari, H., 2019b. Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, Vol. 75, pp. 341-344. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41586-019-1740-z>.
21. Gafurov, A., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Duethmann, D., Merkushkin, A. and Merz, B., 2015. Snow-cover reconstruction methodology for mountainous regions based on historic in situ observations and recent remote sensing data. *The Cryosphere*, Vol. 9, pp. 451–463. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-9-451-2015>.

-
22. GAPHAZ, 2017. Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions – Technical Guidance Document. Prepared by Allen, S., Frey, H., Huggel, C., Bründl, M., Chiarle, M., Clague, J.J., Cochachin, A., Cook, S., Deline, P., Geertsema, M., Giardino, M., Haeberli, W., Kääb, A., Kargel, J., Klimes, J., Krautblatter, M., McArdell, B., Mergili, M., Petrakov, D., Portocarrero, C., Reynolds, J. and Schneider, D. Standing Group on Glacier and Permafrost Hazards in Mountains (GAPHAZ) of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS) and the International Permafrost Association (IPA). Zurich, Switzerland / Lima, Peru, 72 pp.
 23. Gruber, S., 2012. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, Vol. 6, pp. 221–233. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>.
 24. Gruber, S., Fleiner, R., Guegan, E., Panday, P., Schmid, M.-O., Stumm, D., Wester, P., Zhang, Y. and Lin, Z., 2017. Review article: Inferring permafrost and permafrost thaw in the mountains of the Hindu Kush Himalaya region. *The Cryosphere*, Vol. 11, pp. 81-99. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-11-81-2017>.
 25. Haeberli, W. and Linsbauer, A., 2013. Global glacier volumes and sea level – small but systematic effects of ice below the surface of the ocean and of new local lakes on land. Brief communication, *The Cryosphere*, Vol. 7, pp. 817-821.
 26. Haeberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Lehmann Friedli, Th., Schaub, Y. and Schleiss, A.J., 2016. New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*, Vol. 139, No. 2, pp. 201-214. Available at: <http://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5>.
 27. Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S. and Vonder Mühl, D., 2006. Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 17/3, pp. 189-214. Available at: <http://doi.org/10.1002/ppp>.
 28. Haeberli, W., Kääb, A., Vonder Mühl, D. and Teyssere, Ph., 2001. Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Grubengletscher, Valais, Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, Vol. 47, No. 156, pp. 111-122.
 29. Haeberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M. and Phillips, M., 2010. Mountain permafrost: Development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 200 (special issue), pp. 1043-1058.
 30. Haeberli, W., Schaub, Y. and Huggel, C., 2017. Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, Vol. 293, pp. 405-417. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>.
 31. Hagg, W., Hoelzle, M., Wagner, S., Mayr, E. and Klose, Z., 2013. Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu-Darya basin until 2050. *Global and Planetary Change*, Vol. 110, pp. 62–73. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.05.005>.
 32. Hoelzle, M., Azisov, E., Barandun, M., Huss, M., Farinotti, D., Gafurov, A., Hagg, W., Kenzhebaev, R., Kronenberg, M., Machguth, H., Merkushev, A., Moldobekov, B., Petrov,

- M., Saks, T., Salzmann, N., Schöne, T., Tarasov, Y., Usabaliev, R., Vorogushyn, S., Yakovlev, A. and Zemp, M., 2017. Re-establishing glacier monitoring in Kyrgyzstan and Uzbekistan, Central Asia. *Geoscientific Instrumentation, Methods, and Data Systems*, Vol. 6, pp. 397–418. Available at: <http://doi.org/10.5194/gi-6-397-2017>.
33. Hoelzle, M., Barandun, M., Bolch, T., Fiddes, J., Gafurov, A., Muccione, V., Saks, T. and Shahgedanova, M., 2019. The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia. Chapter 8 in Xenarios, S., Schmidt-Vogt, D., Qadir, M., Janusz-Pawletta, B. and Abdullaev, I. (eds.): *The Aral Sea Basin - Water for Sustainable Development in Central Asia*. Routledge, London and New York.
34. Huggel, C., Carey, M., Clague, J.J. and Kääh, A. (eds.), 2015. *The High-Mountain Cryosphere – Environmental Changes and Human Risks*. Cambridge University Press, 363p.
35. Huss, M. and Hock, R., 2015. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 3, pp. 1–22. Available at: <http://doi.org/10.3389/feart.2015.00054>.
36. Huss, M. and Hock, R., 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, Vol. 8, pp. 135-140. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>.
37. Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R., Clague, J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D., Greenwood, G., Mark, B., Milner, A., Weingartner, R. and Winder, M., 2017. Towards mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, Vol. 5, pp. 418-435. Available at: <http://doi.org/10.1002/2016EF000514>.
38. IPCC, 2014. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Fifth Assessment Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
39. IPCC SROCC, in Press, 2019. *Special Report on the Ocean and Cryosphere*. WMO and UNEP.
40. Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K. and Betts, R.A., 2018. Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 2834. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>.
41. Kääh, A., Treichler, D., Nuth, C. and Berthier, E., 2015. Brief Communication: Contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir–Karakoram–Himalaya. *The Cryosphere*, Vol. 9, pp. 557–564. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-9-557-2015>.
42. Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Machguth, H., Severskiy, I. and Medeu, A., 2017. Assessment of evolution and risks of glacier lake outbursts in the Djungarskiy Alatau, Central Asia, using Landsat imagery and glacier bed topography modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 1837–1856. Available at: <http://doi.org/10.5194/nhess-17-1837-2017>.
43. Kaser, G., Großhauser, M. and Marzeion, B., 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of*

- Sciences, Vol. 107, pp. 20223–20227. Available at: <http://doi.org/10.1073/pnas.1008162107>.
44. Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B. Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H. and Tonidandel, D., 2014. A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). *Quaternary Research*, Vol. 83, No. 2, pp. 324–335. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.12.005>.
45. Krautblatter, M., Funk, D. and Günzel, F.K., 2013. Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 38, pp. 876–887. Available at: <http://doi.org/10.1002/esp.3374>.
46. Linsbauer, A., Frey, H., Haeberli, W., Machguth, H., Azam, M.F., Allen, S., 2016. Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya–Karakoram region. *Annals of Glaciology*, Vol. 57, No. 71, pp. 119–130. Available at: <http://doi.org/10.3189/2016AoG71A627>.
47. Magnin, F., Haeberli, W., Linsbauer, A., Deline, P. and Ravelin, L., 2019. Estimating glacier-bed overdeepenings as possible sites of future lakes in the de-glaciating Mont Blanc massif (Western European Alps). *Geomorphology*, Vol. 350. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106913>.
48. Marchenko, S.S., Gorbunov, A.P. and Romanovsky, V.E., 2007. Permafrost warming in the Tien Shan Mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change*, Vol. 56, pp. 311–327.
49. Marzeion, B., Champollion, N., Haeberli, W., Langley, K., Leclercq, P. and Paul, F., 2016. Observation-based estimates of global glacier mass change and its contribution to sea-level change. *Surveys in Geophysics*, Vol. 38, No. 1, pp. 105–130. Available at: <http://doi.org/10.1007/s10712-016-9394-y>.
50. Marzeion, B., Kaser, G., Maussion, F. and Champollion, N., 2018. Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss. *Nature Climate Change*, Vol. 8, Letters, pp. 305–308. Available at: <http://doi.org/10.1038/s41558-018-0093-1>.
51. McDowell, G., Huggel, C., Frey, H., Wang, F.M., Cramer, K. and Vincent, R., 2019. Adaptation action and research in glaciated mountain systems: Are they enough to meet the challenge of climate change? *Global Environmental Change*, Vol. 54, pp. 19–20. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.012>.
52. Mernild, S. H., Lipscomb, W. H., Bahr, D. B., Radi, V. and Zemp, M., 2013. Global glacier changes: a revised assessment of committed mass losses and sampling uncertainties. *The Cryosphere*, Vol. 7, No. 5, pp. 1565–1577. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-7-1565-2013>.
53. Mollaret, C., Hilbich, C., Pellet, C., Flores-Orozco, F., Delaloye, R. and Hauck, C., 2018. Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites. *The Cryosphere Discussion*. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-2018-272>.

-
54. MRI, 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Mountain Research Initiative EDW Working Group. *Nature Climate Change*, Vol. 5/2015. pp. 424-430. Available at: <http://doi.org/10.1038/NCLIMATE2563>.
 55. Noetzli, J. and Gruber, S., 2009. Transient thermal effects in Alpine permafrost. *The Cryosphere*, Vol. 3, pp. 85–99. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-3-85-2009>.
 56. Obu, J., Westermann, S. Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääb, A., Leibman, M., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J. and Zou, D., 2019. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth Science Reviews*, Vol. 193, pp. 299-316. Available at: <http://dx.doi.org/j.earscirev.2019.04.023>.
 57. Peters, J., Bolch, T., Gafurov, A. and Prechtel, N., 2015. Snow cover distribution in the Aksu Catchment (Central Tien Shan) 1986–2013 based on AVHRR and MODIS data. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 8, No. 11, pp. 5361-5375. Available at: <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2477108>.
 58. Pohl, C. and Hirsch Hadorn, G., 2007. Principles for designing transdisciplinary research – proposed by the Swiss Academies of Arts and Sciences. Oekom Verlag, München, 124 pp.
 59. RGI Consortium, 2017. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. Available at: <http://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
 60. Roer, I., Haeberli, W., Avian, M., Kaufmann, V., Delaloye, R., Lambiel, C. and Kääb, A., 2008. Observations and considerations on destabilizing active rock glaciers in the European Alps. In: Kane, D.L. and Hinkel, K.M. (eds): Ninth International Conference on Permafrost, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, Vol. 2, pp. 1505-1510.
 61. Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. and García, J., 2014. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, Vol. 35, pp. 145-155. Available at: <http://doi.org/10.5194/adgeo-35-145-2014>.
 62. Siegfried, T., Bernauer, T., Guiennet, R., Sellars, S., Robertson, A.W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P. and Yakovlev, A., 2012. Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, Vol. 112, pp. 881–899. Available at: <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0253-z>.
 63. Somos-Valenzuela, M.A., Chisolm, R.E., Rivas, D.S., Portocarrero, C. and McKinney, D.C., 2016. Modeling glacial lake outburst flood process chain: The case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 20, pp. 2519–2543. Available at: <http://doi.org/10.5194/hess-20-2519-2016>.
 64. Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O. and Beniston, M., 2012. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). Review, *Nature Climate Change*, Vol. 2, pp. 725–731. Available at: <http://doi.org/10.1038/nclimate1592>.

-
65. Treichler, D., Käab, A., Salzmann, N. and Xu, Ch-Y., 2019. Recent glacier and lake changes in High Mountain Asia and their relation to precipitation changes. *The Cryosphere*, Vol. 13, pp. 2977–3005. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-13-2977-2019>.
66. Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Duethmann, D., Mandychev, A. and Merz, B., 2013. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review. *Global and Planetary Change*, Vol. 110, pp. 4–25. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.004>.
67. WCRP, 2018. Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data*, Vol. 10, pp. 1551–1590. Available at: <http://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.
68. WGMS, 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014-2015). Zemp, M., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Huber, J., Machguth, H., Paul, F., and Hoelzle, M. (eds.), ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, publication based on database version: Available at: <http://doi.org/10.5904/wgms-fog-2017-10>.
69. Worni, R., Huggel, C., Clague, J.J., Schaub, Y. and Stoffel, M., 2014. Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. *Review, Geomorphology*, Vol. 224, pp. 161-176. Available at: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.031>.
70. Yafyazova, R.K., 2011. Disastrous debris flows connected with glacial processes and defense methods against them in Kazakhstan. 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, pp. 1101-1110 Available at: <http://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-119>.
71. Zaginaev, V., Falatkova, K., Jansky, B., Šobr, M. and Erokhin, S., 2019. Development of a Potentially Hazardous Pro-Glacial Lake in Aksay Valley, Kyrgyz Range, Northern Tien Shan. *Hydrology*, Vol. 6, No. 3. Available at: <http://doi.org/10.3390/hydrology6010003>.
72. Zekollari, H., Huss, M. and Farinotti, D., 2018. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere Discussion*. Available at: <http://doi.org/10.5194/tc-2018-267>.
73. Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S.U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlstrøm, A.P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L.N., Ceres, B.E.C., Casassa, G., Cobos, G., Vila, R.R.D., Delgado Grana-dos, H., Demuth, M.N., Espizua L., Fischer, A., Fujita, K., Gadek, B., Ghazanfar, A., Hagen, J.O., Holmlund, P., Karimi, N., Li, Zh., Pelto, M., Pitte, P., Popovnin, V.V., Portocarrero, C.A., Prinz, R., Sangewar, C.V., Severskiy, I., Sigurdsson, O., Soruco, A., Usabaliev, R. and Vincent, C., 2015. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, Vol. 61, No. 228, pp. 745-762. Available at: <http://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>.

-
74. Zhao, L., Marchenko, S.S., Sharkuu, N. and Wu, T., 2008. Regional changes of permafrost in Central Asia. Plenary Paper, Ninth International Conference on Permafrost, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, Vol. 1, pp. 2061-2069.

Важные веб-сайты:

Glacier and Permafrost Hazards in Mountains: <http://gaphaz.org/> Global Terrestrial Network for Glaciers: <http://www.gtn-g.ch>

Global Terrestrial Network for Permafrost: <http://gtnp.arcticportal.org/> Global Climate Observing System: <http://gcos.wmo.int/en/home>

World Glacier Monitoring Service: <http://wgms.ch/> Global Land Ice Measurements from Space <http://www.glims.org/> National Snow and Ice Data Center <https://nsidc.org/>