

Прикладные проблемы

УДК 511.311.21.(234.9)

Динамика приледниковых озёр бассейна р. Малая Алматинка по данным наземного мониторинга

© 2014 г. Н.Е. Касаткин

Институт географии МОН Республики Казахстан, Алматы

kasatkinne@mail.ru

Статья принята к печати 9 июня 2013 г.

Батиметрия, геоэлектроразведка, режим моренных озёр.
Bathymetry, geoelectrical prospecting, mode of moraine lakes.

Несколько последних лет проводился мониторинг трёх моренных озёр в одном из горно-ледниковых бассейнов. Установлено, что все озёра имеют индивидуальный температурный режим, который зависит не столько от температуры воздуха, сколько от режима поступления талых вод, объёма их аккумуляции и типа подстилающих пород, в которых формировалась озёрная котловина. У латерального озера дамбой служит лёд боковой морены соседнего ледника. При непосредственном контакте озёрной воды с ледниковым льдом её температура в период абляции на 2,54 °С, или в 3,1 раза, ниже, чем во фронтальных озёрах. В связи с интенсивным разрушением дамбы площадь и объём озера увеличиваются. Максимальные глубины зафиксированы там, где ещё год назад находился ледяной берег, высотой не менее 15 м. У озёр, расположенных на фронтальных моренах, из-за мощного моренного чехла дамбы разрушаются значительно меньше. Динамика этих озёр обусловлена отступанием питающих их ледников, а максимальные глубины установлены в центральных частях. Температура воды здесь в холодный период сохраняется устойчиво положительной и способствует формированию фильтрационных каналов в слое моренных отложений ниже границы слоя межгрядовых изменений температуры мёрзлых пород. Питание озёр происходит в основном за счёт абляции льда с ближайшего ледника. Осадки несут существенно влияют на изменение уровня воды в этих озёрах.

Введение

Цель данной работы — на основе сравнительного анализа данных наземного мониторинга оценить изменения характеристик трёх ледниковых озёр, расположенных в небольшом диапазоне высот (3450–3590 м над ур. моря), но в разных условиях рельефа. Эти озёра находятся на моренах трёх ледников Туюксуйской группы в верховьях р. Малая Алматинка на северном склоне Заилийского Алатау (43,05° с.ш., 77,08° з.д.) примерно в 30 км от г. Алматы (рис. 1). Два из них расположены на фронтальных моренах (№ 1 и 6), а одно относится к латеральному (№ 9). В процессе работы при помощи автоматических логгеров для непрерывной фиксации температуры воды, воздуха и глубины озёр, эхолота с функцией GPS, электронного тахеометра и геоэлектрорадара была получена информация о температурном режиме воды озёр и воздуха в непосредственной близости от них, определён объём аккумуляции воды, морфометрические параметры озёрных котловин и прилегающих

к ним территорий, а с помощью геоэлектроразведки получены данные о составе озёрных дамб.

В периоды абляции 2010 и 2011 г. с помощью логгеров MDS Dipper-3 и НОВО U-003 на всех трёх озёрах вели непрерывный мониторинг температуры воздуха (на морене непосредственно у берега озера) и воды на фиксированных глубинах, вплоть до дна озера. Более пристальное внимание уделяли мониторингу режима наибольшего по площади зеркала и объёму аккумуляции воды озера № 6, расположенного у конца ледника Маншук Маметовой. По мнению ряда специалистов, это озеро представляет собой реальную опасность, так как прорыв его плотины приведёт к формированию селя с катастрофическими последствиями для г. Алматы с населением более 1,3 млн человек [1, 2]. По этой причине последние 15 лет озеро № 6 — предмет постоянного внимания Государственного учреждения «Казселезащита», силами которого неоднократно проводился принудительный сброс части озёрной воды путём углубления кана-

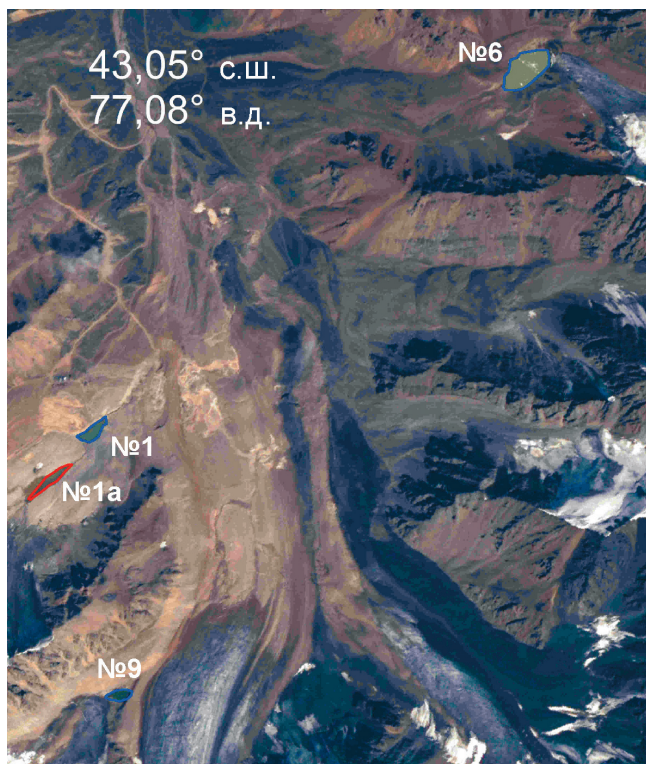


Рис. 1. Район исследований
Fig. 1. The area of research

ла стока на озёрной плотине или с помощью сифона. В 2010 г. была создана рабочая группа, силами которой с конца июля по август практически вручную уровень озёрной перемычки у канала стока был понижен на 0,49 м со сбросом соответствующего объёма озёрной воды. На завершающем этапе этих работ в озере был установлен сифон, диаметром 200 мм. В результате этих мероприятий со 2 августа по 2 октября 2010 г. уровень воды в озере, по нашим измерениям, понизился на 4,7 м, а объём воды – на 100 тыс. м³.

Исследования на озере № 6

Параллельно с этими работами мы организовали комплексные наблюдения на озере № 6 и на питающем его леднике Маншук Маметовой. 2 августа 2010 г. проведена батиметрическая съёмка озера эхолотом с функцией GPS Lowrance X126 DF. Объём воды составил 241 630 м³, площадь – 25 175 м². Для непрерывной регистрации температуры воды на фиксированных глубинах в эти же сроки в озере был установлен логгер MDS Dipper-3, данные которого позволяют оценить изменения уровня воды в озере. Логгер установлен до начала работ по принудительному сбросу воды; все изменения уровня

фиксируются с интервалом в 1 ч. Последние данные получены 24 августа 2011 г. Дополнительно, для измерения температуры воздуха, были установлены ещё два логгера НОВО U23-003: первый – на морене, в непосредственной близости от озера (на высоте 3590 м); второй – на леднике Маншук Маметовой (3732 м). Эти логгеры фиксируют температуру воздуха синхронно с MDS Dipper-3. Температура воды в озере в периоды абляции оставалась устойчивой и в основном изменялась в диапазоне 3–5 °С. Отметим, что резкое понижение температуры воздуха с 4 по 13 сентября 2010 г. (на 22 °С) не повлияло на температуру озёрной воды. Это объясняется тем, что термический режим озера определяется не столько динамикой температуры воздуха, сколько температурой поступающих в озеро талых ледниковых вод, которая относительно стабильна.

Ход уровня воды в озере (рис. 2) отражает изменения, обусловленные принудительным сбросом воды. Так, в августе 2010 г. они связаны с постепенным углублением канала стока на озёрной плотине, а в последующие две декады – со сбросом воды с помощью сифона. После падения уровня воды ниже водоприёмника сифона уменьшение объёма озера можно объяснить только наличием естественных фильтрационных каналов в дне озёрной ванны. По устному свидетельству В.П. Благовещенского, до 1996 г. уровень озера № 6 круглый год был постоянным. Это возможно только при полной герметичности дна и дамбы озера. Гидроупорный слой могут создавать коренные породы, сплошная кровля многолетнемёрзлых пород либо их сочетание в результате смерзания. Зафиксированное падение уровня в период с 15 января 2011 г. по 22 апреля 2011 г. (в среднем 7 см/сут, или ≈ 641 м³/сут) свидетельствует об образовании внутриморенных фильтрационных каналов стока. Именно поэтому стал актуален вопрос о дальнейшей их эволюции. Сложность заключается в том, что в дамбе озера нигде нет выходов фильтрационных вод и об изменении пропускной способности каналов можно судить только по изменению темпа и объёма опорожнения озера в холодный период года, когда полностью отсутствует поступление талых вод с ледника и из моренного комплекса.

На рис. 2 видно, что уровень озера № 6 понижался до момента перехода среднесуточных температур воздуха на леднике через 0 °С к положительным значениям. Затем началось его относительно быстрое повышение – в среднем на 19 см/сут, что эквивалентно примерно 1736 м³/сут за период с 22 апреля 2011 г. по 28 мая 2011 г. Сле-

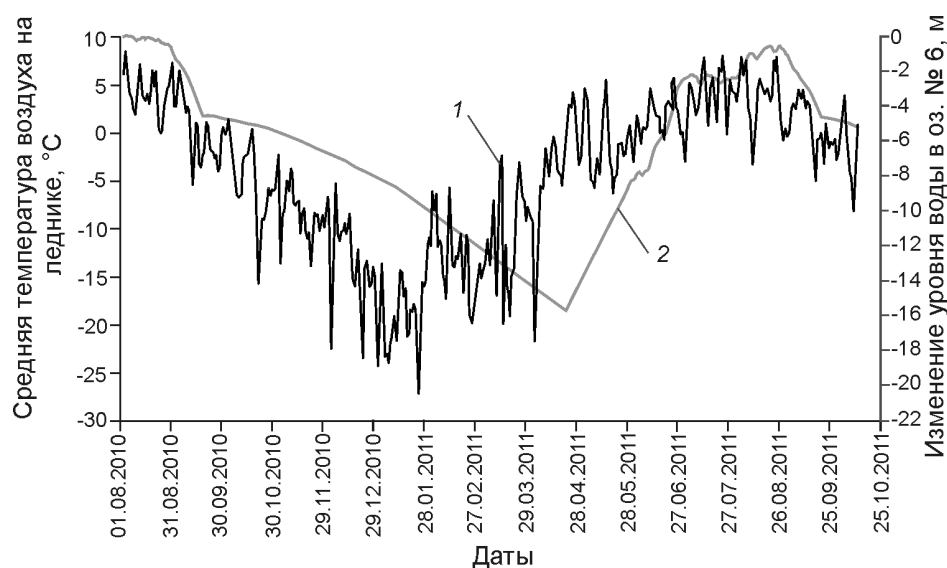


Рис. 2. Изменение среднесуточной температуры воздуха на леднике Маншук Маметовой, °С (1) и уровня воды озера № 6 с 3 августа 2010 г. по 12 октября 2011 г., м (2)

Fig. 2. Change of air temperature at Manshuk Mametov's Glacier, °С (1) and depths of the lake № 6 from 3.08.2010 to 12.10.2011, m (2)

довательно, объём общего поступления воды в озеро № 6 составил примерно $2377 \text{ м}^3/\text{сут}$ (приход плюс фильтрация).

Для мониторинга абляции снега и льда на питающем озеро леднике 2 августа 2010 г. было забурено девять абляционных реек, привязанных к геодезическим координатам. Согласно результатам наблюдений, осреднённая по девяти точкам суммарная абляция льда со 2 августа по 2 октября 2010 г. составила 127 см, или 1,14 м в водном эквиваленте (в.э.). Это на 0,47 м в в.э. больше величины абляции льда за тот же период и в том же высотном интервале (от 3700 до 3730 м) на леднике Центральный Туяксу (0,67 м в.э.). В 2011 г. с 6 июня по 1 сентября суммарная абляция льда составила 115 см, или 1,03 м (в.э.), что на 0,44 м в в.э. больше величины абляции льда на леднике Центральный Туяксу (0,59 м в.э.). Выявленные различия таяния можно объяснить неодинаковой экспозицией ледников в области абляции. На леднике Центральный Туяксу — это относительно пологая поверхность северной ориентации, на леднике Маншук Маметовой — крутой склон западной ориентации. Поэтому продолжительность солнечного сияния на леднике Маншук Маметовой больше, чем на леднике Центральный Туяксу; соответственно больше и доля радиационной составляющей в суммарной абляции снега и льда.

Совместно с германским специалистом Я. Лентче методом электроразведки проведены измерения по трём профилям на морене, которая служит дамбой озера № 6. Места закладки профилей выбирались так, чтобы максимально охватить интересный нас участок фронтальной морены, ко-

торая состоит из двух неравных частей. Профиль I проходит по самому высокому поперечному гребню морены. Между точками пересечения профиля I с профилями III и IV начинается овраг, разделяющий далее морену на две ветви. Правая часть, на которой расположен профиль III, — меньшая по размеру, левая, где находится профиль IV, — большая. Профили заложены в южном направлении, почти перпендикулярно профилю I (рис. 3). Профили геозлектроразведки показаны на рис. 4.

После обработки полученных данных геозлектроразведки в Берлине, Я. Лентче любезно предоставил нам результаты — цветные диаграммы прохождения электрических импульсов через разные по льдистости слои морены. Фактически на них отображено электрическое сопротивление, которое затем интерпретируется в геоморфологические разрезы. Сразу отметим, что данный метод ещё только развивается, а полученные рисунки довольно схематичны и по ним нельзя со 100%-й точностью судить о составе моренных отложений. Однако эти данные дают возможность получить довольно точное представление о глубине залегания слоёв с неодинаковой электропроводимостью и, следовательно, с разной льдистостью. На каждом из трёх цветных изображений по вертикальной оси дана абсолютная высота над уровнем моря, а по горизонтальной — длина профиля с учётом топографии поверхности; цветная шкала — электрическое сопротивление в Ом/м.

Проанализируем имеющиеся профили геозлектроразведки. Под обеими точками пересечения профилей, а значит и между ними, очень хорошо отбивается верхний слой моренных отложений,

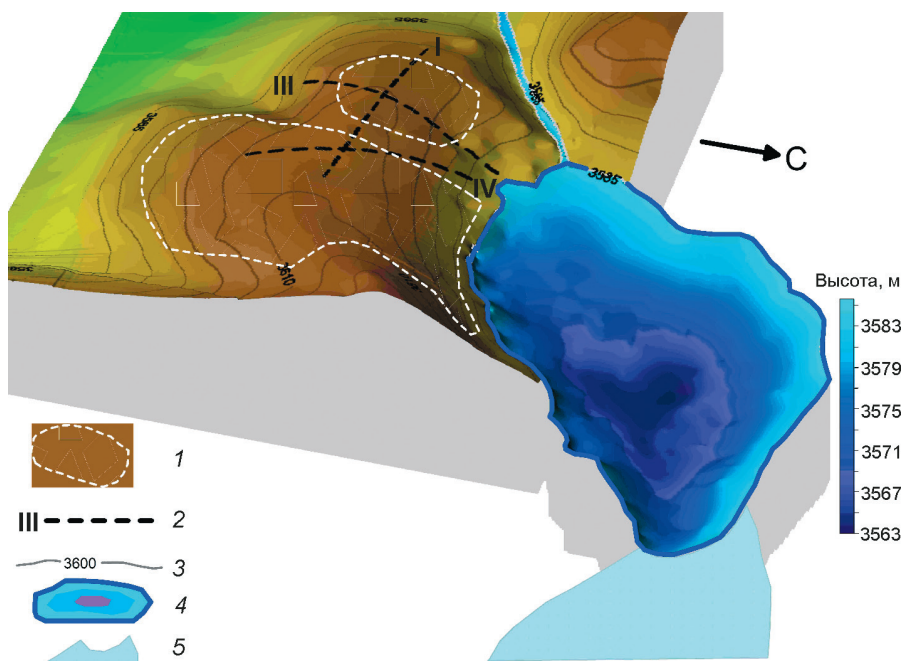


Рис. 3. 3D-модель морены ледника Маншук Маметовой и озера № 6 с предполагаемыми контурами ледяных линз (2010 г.):

1 – предполагаемые контуры ледяных линз; 2 – места расположения профилей геоэлектроразведки; 3 – изогипсы; 4 – озеро № 6; 5 – контур конечной части языка ледника на 2010 г.

Fig. 3. 3D model of the glacier moraine of Manshuk Mаметовой and lake № 6 with prospective contours of ice lenses (2010):

1 – prospective contours of ice lenses; 2 – the locations of profiles geoelectrical prospecting; 3 – contour lines; 4 – lake № 6; 5 – a contour of a final part of glacier tongue for 2010

мощностью от 2 до 3 м, состоящий из отсортированных валунных галечников с щебнистым заполнителем. Аналогичную картину мы наблюдали при геоэлектроразведке в 40 м от места пересечения профилей I и III на левом борту канала стока после того, как сотрудниками ГУ «Казселезащита» при работах по углублению этого канала был вручную снят именно такой слой грунта – около 2 м. Примечательно, что моренный материал лежал непосредственно на чистом льду ледникового генезиса. С большой долей вероятности мы видели именно ту линзу льда, погребённого фронтальной мореной, которая находится в правой ветви. Её толщина в точке пересечения профилей I и III, по данным геоэлектроразведки, около 7 м, длина по профилю I – около 20 м, а по профилю III – около 35 м. Под ней на глубине более 10 м начинается слой с большей электропроводностью и, следовательно, с меньшей льдистостью. Это могут быть сильно льдистые слои с базальной криогенной текстурой. Формирование таких слоёв, по мнению Е.Д. Ермолина, возможно при промерзании водоносных горизонтов, возникающих при фильтрации талых ледниковых вод через морену [1]. По мере продвижения по профилю I от точки пересечения с профилем III к точке пересечения с профилем IV мощность верхнего слоя плавно уменьшается с 3 до 2 м. Примерно в 11–12 м от точки пересечения профиля I с профилем III правая ледяная линза заканчивается и начинается 6–7-метровая, почти вертикальная прослойка с меньшей

льдистостью. Затем мы видим левую ледяную линзу, которая начинается примерно в 25 м от точки пересечения профилей I и IV на глубине около 2,5 м с расширением книзу в сторону точки пересечения профилей I и III. Её мощность пока определить невозможно, так как глубина проникновения электроволн ограничена 20 м. Видно только, что её толщина более 16 м, длина по профилю I – свыше 50 м, а по профилю IV – свыше 100 м.

Логично предположить, что сегодняшние две линзы льда в прошлом были единым целым, а разделил их поток талых ледниковых вод. Вероятно, в этом месте в самом конце последнего оледенения находился поверхностный канал стока. На это указывает форма оврага, который берёт начало между профилями, уходит далеко вниз по долине и очень сильно напоминает высохшее русло ручья. Между этим руслом и нынешним каналом стока видно ещё два таких вреза, меньших по размерам. Это указывает на постепенное смещение канала стока с почти южного направления на почти западное. Угол смещения составляет около 45°.

До 21 января 2011 г. уровень воды в озере опустился относительно летнего максимума на 9,23 м. Это свидетельствует о наличии постоянной внутриморенной (талики в слое вечной мерзлоты) фильтрации. Показательно, что температура воды, измеренная 21 января 2011 г. под ледяным покровом озера, толщиной 46 см, составила +0,8 °С. Предполагается, что в последние годы из-за того, что температура воды в озере круглый год остаёт-

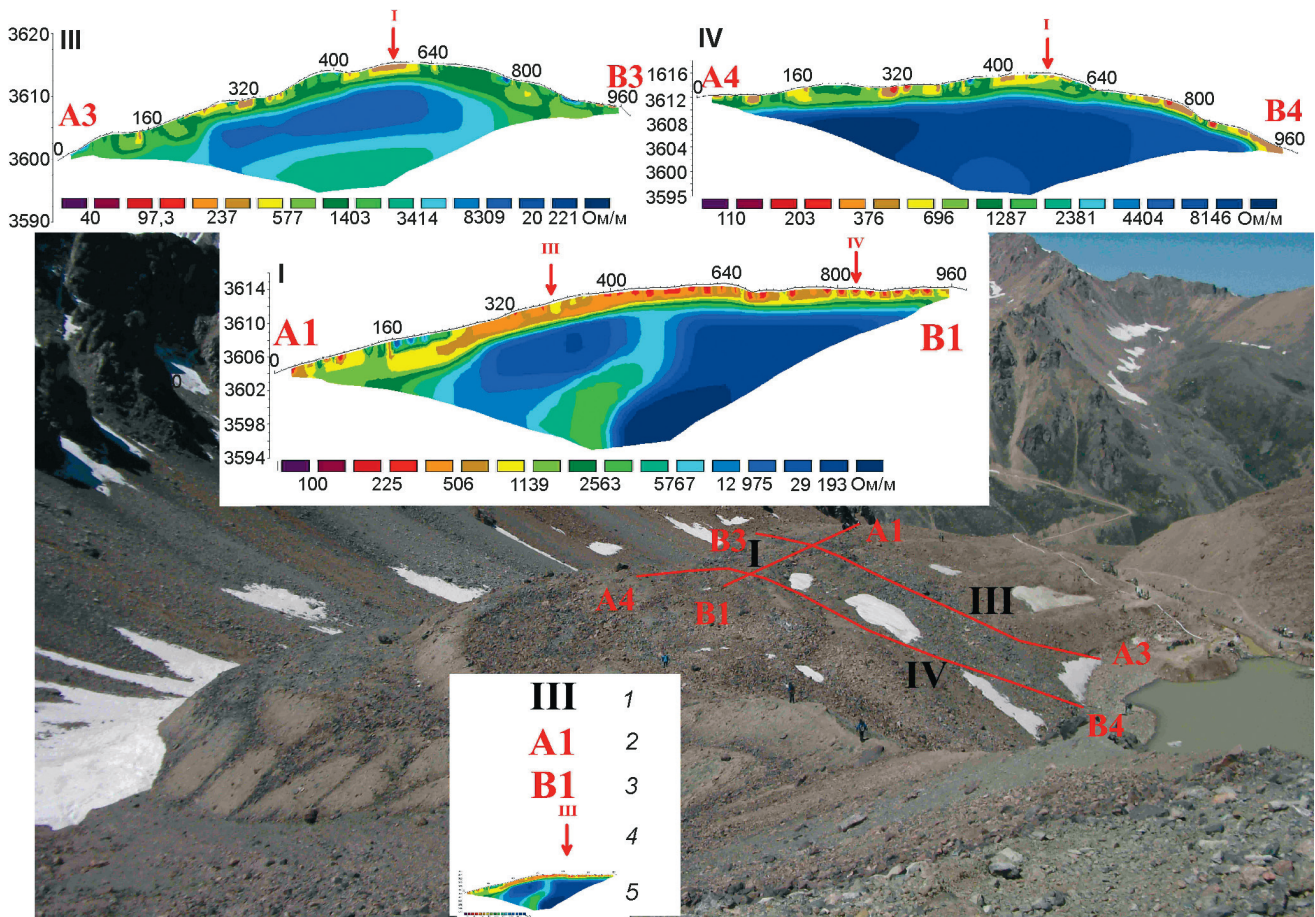


Рис. 4. Профили геоэлектроразведки и их расположение на фронтальной морене ледника Маншук Маметовой (на дамбе озера № 6):

1 – номер профиля геоэлектроразведки; 2 – начало и 3 – конец профиля; 4 – место пересечения профилей; 5 – профили геоэлектроразведки

Fig. 4. Profiles of the geoelectrical prospecting and their site on a frontal moraine of Manshuk Mametovoj Glacier (on a lake dam № 6): 1 – number of a geoelectrical prospecting profile; the initial (2) and end (3) of profile; 4 – place of profiles crossing; 5 – profiles of the geoelectrical prospecting

ся положительной, нарушилась целостность многолетнемёрзлых пород на глубинах более 9–10 м. К 22 апреля 2011 г. уровень озера опустился относительно 2 августа 2010 г. на 16 м. Потеря объёма воды составила 95%, а площади – 82%. Толщина льда достигла 81 см, температура воды опустилась до 0 °С. К 1 июля 2011 г. уровень озера поднялся до уровня, который был летом 2010 г., а температура воды на глубине 3 м возросла до +2,8 °С.

На рис. 5 представлен фрагмент карты, составленной по материалам фотограмметрической съёмки 1958 г., с границей выбранного нами участка, площадью 7 га. На него нанесены: контуры озера 1958 и 2010 г.; контур языка ледника Маншук Маметовой в 2010 г.; места расположения профилей геоэлектроразведки. Хорошо видно, что, преодолевая некое препятствие, ледник меняет направле-

ние движения на 90°. Обнажения коренных пород и характерный изгиб языка ледника дают основания предполагать, что это препятствие – скальный ригель, который также служит гидроупором. Озеро № 6 непосредственно примыкает к языку ледника и периодически наблюдается обрушение значительных по объёму глыб льда с конца языка в озеро.

Площадь озера в 1958 г. составляла 1645 м², к 2010 г. она увеличилась до 25 175 м². По формуле Н.В. Попова $V = 0,059F^{1,44}$ (где V – объём озера, м³, а F – площадь, м²) объём озера в 1958 г. составлял около 2500 м³, а к 2010 г. достиг 241 630 м³. Максимальная глубина в 1958 г. не превышала 2 м, а к 2010 г. увеличилась до 21,3 м. Сейчас озеро расположено на участке, где в 1958 г. находился не только чистый лёд языка ледника Маншук Маметовой, но и его фронтальная морена. Поскольку поверхность

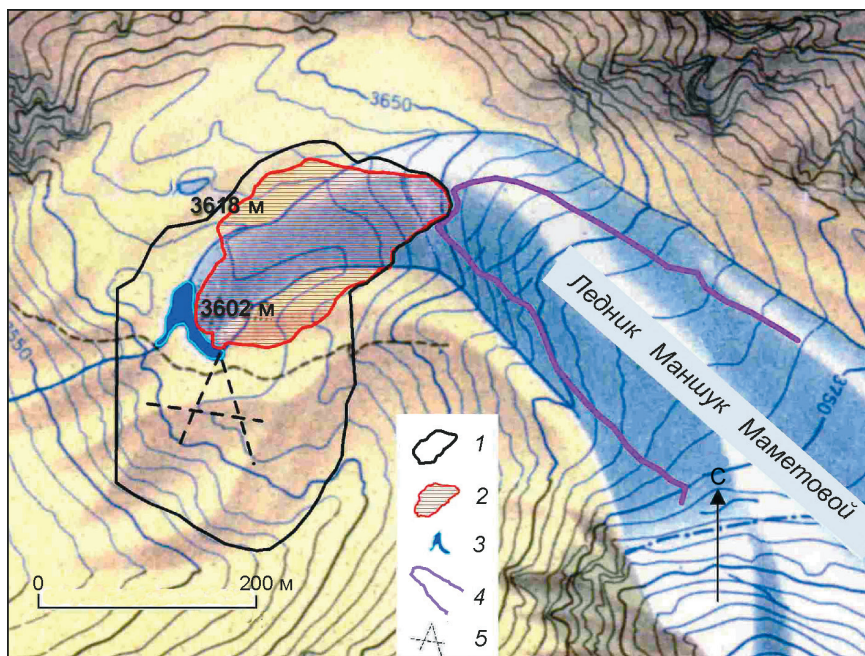


Рис. 5. Язык ледника Маншук Маметовой и озеро № 6 в 1958 и 2010 гг. с выбранным для точного сравнения участком, площадью 7 га:

1 – контур выбранного для точного сравнения участка, площадью 7 га; контур озера № 6 в 2010 (2) и 1958 (3) гг.; 4 – контур конечной части языка ледника Маншук Маметовой на 2010 г.; 5 – места расположения профилей геоэлектроразведки

Fig. 5. Tongue of the Manshuk Mametovoj Glacier and lake № 6 in 1958 and 2010 with the site chosen for precise comparison by the area of 7 hectares:

1 – a contour of the site chosen for precise comparison by the area of 7 hectares; contour of the lake № 6 in 2010 (2) and 1958 (3); 4 – a contour of the tongue of Manshuk Mametovoj Glacier in 2010; 5 – sites of profiles of the geoelectrical prospecting

этой морены в пределах нынешнего контура озера тоже значительно опустилась, можно сделать вывод о высокой льдистости моренных отложений, из которых в воздушной среде лёд вытаивает незначительно, но при контакте с водой темп таяния резко увеличивается, поэтому котловина озера растёт не только в длину, но и в ширину. Объём льда, вытаявшего на площади озера в 2010 г. (36% общей площади выбранного участка 7 га), составляет 73% всего объёма, что ещё раз подтверждает тепляющий эффект воды. Максимальные изменения высоты поверхности (до –73 м) зафиксированы именно внутри контура озера и по руслу канала стока, тогда как поверхность морены, не подверженная тепляющему эффекту водных масс, опустилась незначительно (от 0–5 м на расстоянии от берега озера до 15–20 м в непосредственной близости к нему). В точке озера с максимальной глубиной понижение поверхности достигло 50 м. Всё это хорошо видно на рис. 6.

В направлении от центра озера в сторону канала стока поверхность опустилась значительно меньше, чем в направлении профилей геоэлектроразведки III и IV. Начала данных профилей лежат на довольно крутом участке склона северной ориентации, и под ними, особенно вдоль профиля IV, сосредоточены значительные толщи высокольдистых моренных отложений. Пока крутизна склона позволяет моренному чехлу удерживаться на поверхности и защищать погребённый лёд от таяния. Но на примере озера № 9 (см. далее) мы увидим, что верхний теплоизоляционный слой морены по

мере увеличения крутизны поверхности утрачивает способность удерживаться на склоне и ледяное ядро морены начинает оголяться. Это вызывает резкий рост темпов таяния льда и образование в теле дамбы термокарстовых гротов и тоннелей, что в итоге может привести к прорыву озера. Особое внимание следует уделить измерению глубины озера на участке между его серединой и началом профиля IV, так как именно здесь, на наш взгляд, возможны рассмотренные ранее процессы.

Исследования на озере № 9

Были продолжены исследования латерального моренного озера № 9 под ледником Зои Космодемьянской, начатые нами в 2003 г. Сняты показания с логгеров, установленных в мае 2008 г. непосредственно в озере и на берегу соответственно для определения температуры воды и воздуха. Этот промежуток времени можно условно разделить на периоды, когда вода в озере № 9 была плюсовой и нулевой температуры. Получаются два полных холодных периода, один тёплый, а также два неполных тёплых. Интересно, что летом 2009 г. (17 августа) максимальная температура воды в озере (+2,3 °С) была выше, чем в 2008 г. (14 августа) и 2010 г. (21 августа), когда температура составляла +1,7 °С, несмотря на то, что суммы температур воздуха за три этих лета в 2009 г. (+3585 °С) были значительно ниже, чем в 2008 г. (+6033 °С) и 2010 г. (+4253 °С). Возможно, это объясняется тем, в 2008 г. ещё зимой от ледяного берега озера отко-

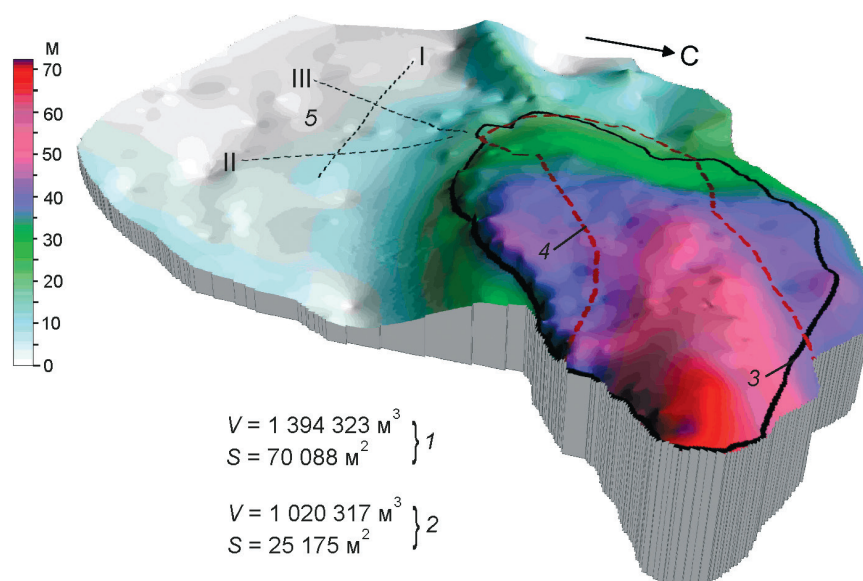


Рис. 6. Изменение высоты поверхности и объёмы растаявшего льда на выбранной территории, площадью 7 га, и в пределах контура озера № 6 по состоянию на 2 августа 2010 г. за период 1958–2010 гг.:

1 – объём растаявшего льда на площади 7 га; 2 – объём растаявшего льда на площади озера № 6 на 2 августа 2010 г.; 3 – контуры озера № 6 на 2 августа 2010 г.; 4 – контур конца ледника Маншук Маметовой в 1958 г.; 5 – места расположения профилей геоэлектроразведки

Fig. 6. Change of the surface elevation and volumes of the melted ice in the chosen territory of 7 hectares and within contour of the lake № 6 as of 2.08.2010 during 1958–2010:

1 – volume of the melted ice on the area of 7 hectares; 2 – volume of the melted ice at the area of lake № 6 for 2.08.2010; 3 – a contour of lake № 6 for 2.08.2010; 4 – contour of the end of Manshuk Mametovoj Glacier in 1958; 5 – location of profiles of the geoelectrical prospecting

лолся большой айсберг, который таял вплоть до наступления следующего холодного периода, поглощая тепло из воды озера.

Что касается 2010 г., то, вероятнее всего, сначала охлаждение осенью 2009 г., а затем и прогревание воды весной и летом 2010 г. замедлил снег, которого тогда выпало значительно больше среднегодовой нормы. По сравнению с предыдущим годом температура воды сначала плавно понижалась, а затем также плавно повышалась. Снежный покров на метеоплощадке Туюксу-1 начал формироваться уже 1 сентября 2009 г. и продержался до 27 июня 2010 г. Озеро же окончательно освободилось ото льда лишь в первых числах августа. Отметим, что продолжительность второго холодного периода (температура воды, равная 0 °С) на 81 день короче первого. Лето 2010 г. было теплее лета 2009 г., кроме того, значительно сократилась продолжительность холодного периода в годовом балансе озера, однако вода не смогла нагреться даже до значений, наблюдавшихся в 2008 г. Согласно данным наблюдений 2009 г., температура воды в озере после окончания холодного периода начинает увеличиваться именно в день начала водоотдачи из снежного покрова. Следовательно, снежный покров значительно влияет на температурный режим воды озера.

22 августа 2010 г. выполнены батиметрическая съёмка озера и подробная тахеометрическая съёмка прилегающей территории. До 21 августа сток из озера происходил ещё по старому каналу, существовавшему с момента образования озера. 21 августа вода начала размывать лёд озёрной дамбы, так как сформировался новый канал стока на участке, где погребённый лёд боковой морены ледника Центральный Туюксу граничит с коренными породами. С утра 21 до полудня 22 августа 2010 г. уровень озера понизился на 1,95 м. 22 августа 2010 г. объём воды в озере составлял 12 192 м³, площадь – 3628 м², т.е. относительно 2009 г. объём уменьшился на 8926 м³, или на 42,3 %, площадь сократилась на 2427 м², или на 40,1%. Опорожнение длилось ещё несколько дней, и к 31 августа 2010 г. уровень озера стабилизировался. 9 сентября 2010 г. выполнена повторная тахеометрическая съёмка озёрной котловины. Согласно её результатам, уровень озера понизился ещё на 4,13 м. Общее понижение уровня с 27 августа 2009 г. по 9 сентября 2010 г. составило 6,08 м, объём воды сократился на 90%, а площадь озера – на 78%. Летом 2011 г. озеро № 9 опорожнилось полностью.

Как и на морене озера № 6, были заложены три профиля геоэлектроразведки для определения размеров ледяных линз в теле моренной дамбы озера

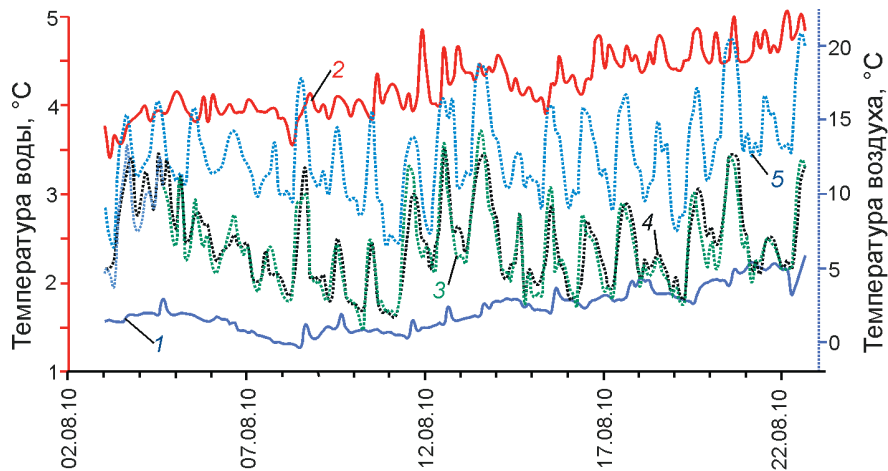


Рис. 7. Изменение температуры воды в озёрах № 6 и 9 по данным логгеров MDS Dipper-3 и HOBO U22-001 Water Temp и температуры воздуха на моренах по данным трёх логгеров HOBO U23-004 Temp/Temp., °C:

температура воды в озере № 9 (1) и № 6 (2); температура воздуха на берегу озера № 9 (3), № 6 (4) и № 1 (5)

Fig. 7. Changes of the water temperature in lakes № 6 and № 9 by data of loggers MDS Dipper-3 and HOBO U22-001 Water Temp, and air temperatures on moraines according to three loggers HOBO U23-004 Temp/Temp., °C: water temperature in lake № 9 (1) and № 6 (2); air temperature on the bank of lakes № 9 (3), № 6 (4) and № 1 (5)

№ 9. Работы проведены до самоопорожнения озера. Отсутствие на озере № 9 сезонных колебаний уровня воды доказывает герметичность дна. Сток происходил исключительно за счёт перелива через перемычку. В 2010 г. вода, найдя слабое место в дамбе, сформировала новый канал стока, который, быстро углубляясь в ледяную толщу вплоть до уровня дна озера, значительно изменил морфометрические параметры последнего. После падения уровня стал виден грот в ледяном теле морены, которая служила дамбой озера № 9. Между этим гротом и нынешним языком ледника Зои Космодемьянской погребённого льда нет. Таким образом, подтверждается наше предположение, что при отступании ледника погребённый лёд остаётся во фронтальной и в боковых моренах, тогда как открытый лёд, лежащий вдоль центральной оси ледника, вытаивает полностью. И решающую роль в этом играет вода приледниковых озёр, которая практически круглый год плавит оставшийся под ней лёд даже сквозь каменный чехол моренных отложений до образования ледяных гротов и тоннелей, по которым в итоге озёра и опорожняются.

Исследования на озёрах № 1 и 1а, расположенных на фронтальной морене ледника Молодёжный

10 июля 2010 г. на озёрах № 1 и 1а проведены батиметрические съёмки эхолотом Lowrance X126 DF. Из-за таяния снежного покрова, высота которого в том году значительно превышала среднегодовую, и обильных весенних снегопадов по-

верхностный слой морены сильно увлажнился, что вызвало сход небольших оползней вокруг озера. Одним из оползней был частично перекрыт канал стока из озера № 1, и уровень воды поднялся примерно на 1 м. В результате, как показала батиметрическая съёмка, объём водной массы, аккумулирующейся в котловине озера, вырос по сравнению с 2008 г. на 4,1 тыс. м³ и составил около 31,5 тыс. м³, а площадь, наоборот, уменьшилась на 800 м². При батиметрической съёмке озера № 1а не выявлено изменений ни по площади, ни по объёму. Поэтому озеро № 1а в данной работе не рассматривается, однако при изменении его морфометрических параметров на нём также будут проведены дополнительные исследования. 5 августа 2011 г. глубины озёр № 1 и 1а были измерены ещё раз. Существенных изменений не установлено.

Обсуждение результатов

Сравним данные, полученные на всех трёх объектах исследований с 3 по 22 августа 2010 г. (рис. 7). Вода в озере № 1 (+4,36 °C) была на 0,3 °C холоднее, чем в озере № 6 (+4,66 °C). Разница незначительная, поэтому, чтобы не усложнять рисунок, ход температуры воды в озере № 1 на диаграмму не вынесен. Иная ситуация с озёрами № 6 и 9. Максимальная температура в озере № 9 (+1,80 °C) зафиксирована в последний срок измерений — 22 августа в 15 часов. Средние за период температуры воздуха на берегах озёр № 6 (+6,63 °C) и № 9 (+6,41 °C) оказались почти одинаковыми, с разницей +0,22 °C в пользу озе-

Температура воздуха на леднике Центральный Туюксу и его моренах с 22.07 по 22.08.2009 г.

Значения параметров	Температура воздуха, °С			Разница температур, °С		
	на леднике	на правой морене	на левой морене	на леднике и правой морене	на леднике и левой морене	на правой и левой моренах
Среднее	3,161	3,860	3,518	-0,699	-0,356	0,342
Минимальное	-1,491	-1,065	-1,277	-2,586	-2,269	-0,247
Максимальное	6,231	7,627	7,322	0,166	0,924	1,026
Сумма	101,167	123,527	112,568	-22,360	-11,400	10,959

ра № 6. На берегу же озера № 1 было почти в 2 раза теплее (+12,67 °С). Напомним, что по абсолютной высоте озеро № 1 находится на 165 м ниже озера № 6 и на 135 м ниже озера № 9. Тенденция изменения температуры воздуха на всех трёх моренах одинаковая. Та же тенденция, но с меньшей амплитудой, отмечается и в воде озёр. Средняя температура воды в озере № 6 за рассматриваемый период равна +3,74 °С, а в озере № 9 – только +1,20 °С. Разница составляет 2,54 °С, т.е. отличается в 3,1 раза. Вероятно, это объясняется тем, что вода озера № 9 непосредственно контактирует с открытым льдом дамбы, который, поглощая значительную часть тепла воды, сам при этом интенсивно вытает.

В 2003 г., на ранней стадии развития, озеро № 9 полностью находилось на скальной площадке. Восточный ледяной берег был пологим настолько, что на нём удерживались моренные отложения, прикрывающие погребённый лёд. К 2005 г. контур озера вышел за пределы скальной площадки, и с 2006 г. в результате резкого увеличения глубины вдоль восточного ледяного берега последний начал интенсивно разрушаться. В результате в дамбе образовался грот с горизонтальным потолком на уровне воды по всей длине данного берега озера, шириной более 10 м. Чем дальше контур озера уходил от скальной ступени, тем быстрее увеличивалась глубина в восточной части озера и бóльшим по объёму становился грот. Соответственно увеличивались размеры и айсбергов, откалывающихся от берега.

В озере № 6 даже очень приблизительно вычисленный вертикальный градиент изменения температуры воды намного больше не только среднего, но и крайних значений, зафиксированных на озере № 9. Скорость теплообмена в воде зависит от скорости её движения. В озере № 6, помимо поверхностного течения, есть подводные течения, которые направлены к входным отверстиям фильтрующих каналов. Отсутствие сезонных колебаний уровня озера № 9 свидетельствует, что на его дне таких отверстий нет. Таким образом, можно сделать вывод, что температурный режим воды

в озёрах абсолютно разный, несмотря на практически идентичный температурный режим воздуха – на морене озера № 6 средняя температура с 3 по 22 августа лишь на 0,2 °С выше, чем на морене озера № 9. Примечательно также, что озеро № 6 по абсолютной высоте на 30 м выше озера № 9, но, тем не менее, на его берегу теплее.

С 22 июля по 22 августа 2009 г. на леднике Центральный Туюксу работало три логгера, установленных на одной абсолютной высоте над уровнем моря в центре ледника и на двух боковых моренах – орографически правой, имеющей западную экспозицию, и левой – с восточной экспозицией. Результаты представлены в таблице. Как среднее за наблюдаемый период значение температуры воздуха, так и максимальное, и минимальное, а также сумма температур на правой морене выше, чем на левой.

Дважды подтвердился тот факт, что на склонах западной экспозиции температура воздуха, а следовательно, и температура поверхности морен выше, чем на склонах восточной экспозиции. Основная часть питания озёр происходит главным образом за счёт абляции льда с ближайшего ледника. Осадки же, если и влияют на изменение уровня воды в озёрах, то незначительно. Стабильное снижение уровней начинается в конце периода абляции с понижением среднесуточных температур воздуха. Глубина в озёрах № 6 и 1 изменялась почти синхронно, несмотря на проведение работ по снижению уровня озера № 6, которое повлияло только на суточные колебания глубины. Кроме того, с установкой сифона опорожнение озера № 6 началось на несколько дней раньше, чем озера № 1, на котором был естественный режим существования.

Заключение

Гидротермический режим ледниковых озёр определяется сочетанием многих факторов, среди которых наиболее значимы следующие: режим притока талых вод; глубина озёрной котловины; объём аккумулятивной воды; тип подстилающих пород. Отметим также, что дата сезон-

ной смены температуры воды ледниковых озёр в начале периода абляции тесно связана с началом водоотдачи из снежного покрова. При прочих равных условиях, температурный режим озёрной воды определяется не столько динамикой температуры воздуха, сколько режимом поступления талых вод, объёмом их аккумуляции и типом подстилающих пород. Чем больше объём и глубина озера, тем более устойчива температура озёрной воды. Решающее значение при этом имеет также тип пород, в которых находится озёрная котловина. При непосредственном контакте озёрной воды с ледниковым льдом (озеро № 9) температура воды минимальна в течение периода абляции и близка к нулю в зимнее время. Тепло расходуется на плавление льда дамбы озера, которая в результате интенсивно разрушается. Всё это позволяет сделать вывод, что латеральные приледниковые озёра характеризуются большей степенью прорывоопасности по сравнению с озёрами, расположенными на фронтальных моренах и имеющих более прочные дамбы.

В озере № 6, где нет непосредственного контакта с открытым льдом и более глубоком, температура воды летом в 3,1 раза выше, чем в озере № 9. В течение холодного периода в нём сохраняется устойчиво положительная температура, которая способствует формированию фильтрационных каналов в моренных отложениях, не слишком насыщенных льдом, ниже границы слоя межгодовых изменений температуры мёрзлых пород (на глубинах около 15 м в условиях рассматриваемого региона). Характерное для нивально-гляциального пояса сплошное распространение высокольдистых мёрзлых пород либо погребённых льдов, начиная с глубин 2–2,5 м, подтверждено при механическом углублении канала стока из озера № 6 в 2010 г. и результатами геоэлектрондирования. Наличие мерзлоты создаёт специфические условия устойчивости дамб значительных по объёму ледниковых озёр, снижая вероятность одновременного сброса всего объёма аккумулязированной озёрной воды при прорыве дамбы. В данном слу-

чае наиболее вероятно разрушение перемычки на глубину сезонно-талого слоя моренных отложений, слагающих дамбу (на глубину до 2,5–3 м). Поэтому целесообразность искусственного углубления канала стока ниже кровли многолетней мерзлоты сомнительна. Такие работы могут спровоцировать неконтролируемые процессы, связанные с утратой устойчивости вскрытых многолетнемёрзлых грунтов, и тем самым повысить риск формирования гляциальных селей.

Литература

1. Ермолин Е.Д. О криогенном строении морен Заилийского Алатау // Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР. Новосибирск: Наука, 1980. С. 147–153.
2. Казглавселезащита при Совете Министров Казахской ССР: Отчет о результатах паспортизации моренных озер Заилийского Алатау. Алма-Ата, 1980. 152 с.

Summary

Monitoring of three moraine lakes (two of which are located on frontal moraines, and one is lateral) lasted some years. It was defined that each lake has individual temperature mode which depends partly by air temperature and much more by incoming melted waters, volume of their accumulation and type of underlying rocks. Type of underlying rock in which the lake kettle is formed has decisive importance. Direct contact of lake water with glacier ice gives its temperature during ablation period of 2.54 °C or in 3.1 times lower, than in frontal lakes. That's why the dam quickly collapses and the lake volume increases. Dams of the lakes located on frontal moraines are subject of destruction much less. Dynamics of these lakes is caused by retreat of glaciers, and the maximum depths are fixed in the central part of a lake. Water temperature during the cold period remains here steadily positive and promotes formation of filtration channels in the layer with moraine sediments which almost without ice. The increasing of lakes occurs due to ice ablation from the nearest glacier. Precipitations, if they influence to the change of water level in lakes, are not essential.