

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.34; 550.37

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТОЛЩИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПЕРЕВАЛА ЖОСАЛЫКЕЗЕНЬ (СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

Э.В. Северский, В.В. Оленченко*, А.П. Горбунов

*Казахстанская высокогорная геокриологическая лаборатория
Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
050000, Алматы, а/я 138, Казахстан; permafrost.08@mail.ru*

** Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3, Россия; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru*

Представлены результаты исследований толщи мерзлых пород альпийского типа методами термометрии и электроразведки. С помощью геоэлектрических моделей показано влияние естественных и антропогенных локальных факторов, таких как экспозиция склона, тектоника, отепляющее и охлаждающее действие фундаментов зданий, на строение многолетнемерзлой толщи. Смена экспозиции склона отражается на геоэлектрических моделях понижением удельного электрического сопротивления опорного горизонта, нарушением его сплошности и уменьшением мощности. В зоне пересечения разломов наблюдается прерывистый и(или) островной характер строения горизонта высокого удельного электрического сопротивления, интерпретируемого как толща мерзлых пород. В период сейсмических событий здесь наблюдается повышение температуры пород вплоть до положительных значений. Формирование таликов отмечено по геофизическим данным в основании деформированного здания, местах аккумуляции снега у снегозаградительных устройств и под участками с асфальтированным покрытием.

Толща мерзлых пород, температура, разлом, талик, электрическое зондирование, электротомография

**INFLUENCE OF LOCAL FACTORS ON THE STRUCTURE OF PERMAFROST,
ZHOSALYKEZEN PASS (NORTH TIEN SHAN)**

E. V. Severskiy, V. V. Olenchenko*, A. P. Gorbunov

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Kazakhstan Alpine Geocryological Laboratory,
050000, Almaty, P/O box 138, Kazakhstan; permafrost.08@mail.ru*

** Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
630090, Novosibirsk, SB RAS, pr. Akad. Koptiyuga, 3, Russia; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru*

The results of studies of mountain permafrost of Alpine type by the methods of thermometry and geoelectrical survey are presented. The influence of natural and anthropogenic local factors on the structure of permafrost is demonstrated using the geoelectric models. Such factors include the exposition of the slope, the tectonics, the warming and cooling effects of the foundations of buildings. Changing slope exposure is expressed on geoelectric models by the decreasing of resistivity of high-resistance horizon, the violation of its continuity and the decreasing of its thickness. In the area of faults the discontinuous or island character of high-resistance horizon (permafrost) is observed. During the seismic events the temperature of rocks increases here up to the positive values. According to geophysical data, the formation of taliks occurs in the basis of deformed buildings, in the places of accumulation of snow at snow barriers and under the sites with asphalt covering.

Permafrost, temperature, electrical resistivity tomography, fault, talik, electrical sounding, electrotomography

ВВЕДЕНИЕ

За последние 20 лет в различных странах мира проблема оценки состояния и прогноза эволюции толщи мерзлых пород (ТМП) в условиях меняющегося климата стала одной из приоритетных задач геокриологов и других специалистов. С этой точки зрения высокогорные ТМП являются

уникальным объектом для исследования. При резкой расчлененности рельефа здесь на одной и той же абсолютной высоте геокриологические условия могут изменяться на очень незначительных расстояниях – от первых до сотни метров. Это позволяет организовать на одном и том же относи-

тельно небольшом участке исследований одновременные наблюдения за динамикой ТМП различных типов распространения – от редкоостровного на склонах южной экспозиции до сплошного на северных склонах. Наблюдения за температурой пород проводятся в скважинах, а для определения морфометрических параметров ТМП наряду с бурением применяются геофизические методы.

Одним из таких уникальных в геокриологическом отношении объектов является перевал Жосалыкезень, расположенный на хребте Илейский Алатау (Зайлийский Алатау) в Северном Тянь-Шане. Здесь с 1974 г. проводятся геотермические наблюдения за ТМП и сезонноталым слоем. В 2013 г. в этом месте выполнены геофизические исследования строения ТМП методом вертикального электрического зондирования в современной модификации – электротомографией.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Перевал Жосалыкезень (Охристая седловина) находится на водоразделе рек Проходная и Озерная (бассейн Большой Алматинки – Улькен Алматы). Его координаты 43°02' с.ш. и 76°55' в.д., альтитуда – 3336 м. В начале 1950-х гг. здесь было построено первое здание в Казахстане на ТМП – Тянь-Шанская высокогорная научная станция Физического института им. Н.П. Лебедева АН СССР (ФИАН). Перед началом строительства по неглубоким шурфам сложилось ошибочное суждение, что здесь имеет место лишь сезонное промерзание грунтов. Поэтому первое отапливаемое кирпичное здание на ленточном фундаменте сооружалось без учета ТМП в основании. Это привело к тому, что уже в начале 1960-х гг. стали появляться первые признаки деформации здания. В связи с этим в 1962 г. по заданию Казпромстройпроекта здесь были проведены первые геокриологические исследования сотрудниками Института мерзлотоведения (ИМЗ) АН СССР.

В результате выполнения этих работ были получены важные данные, в частности, в штольне, проходка которой велась в конце 1950-х гг. на пологом склоне восточной экспозиции на абсолютной высоте около 3300 м. Штольня длиной 50 м проходила в ТМП. Забой штольни оказался на глубине 15 м от поверхности. В забое была пробурена скважина глубиной 3 м. В ней на глубине 18 м от дневной поверхности температура в 1962 г. была $-0,8^{\circ}\text{C}$. При этом, возможно, уже сказалось отепляющее воздействие на мерзлые породы положительных температур воздуха в штольне, естественная температура на глубине 18 м могла быть более низкой. Эти данные свидетельствуют, что мощность ТМП здесь порядка 25–30 м. Получена, таким образом, первая оценка мощности ТМП для района перевала.

В толще мерзлых пород, которая была вскрыта в штольне, присутствуют валуны. Они составляют 5–10 % объема отложений. Остальной состав грунтов приходится на щебень, дресву и мелкозем. Объемный вес мерзлого грунта варьировал от 1,39 до 2,24 г/см³.

В связи с продолжением строительства различных сооружений станции ФИАН в 1966 и 1973 гг. Казахским Государственным институтом инженерных изысканий (КазГИИЗ) проводились дополнительные исследования на перевале. Было установлено, что глубина сезонноталого слоя в районе перевала изменяется от 3,3 до 4,7 м. Кроме того, в скважине (скв.) № 1 глубиной 27 м с глубины 24 м проходка велась в скальных породах (гранитах). Температура в забое скважины около 0°C , а мощность ТМП порядка 30–35 м.

В настоящее время на перевале Жосалыкезень на площади около 3 км² располагается несколько зданий и специальных сооружений Тянь-Шанской высокогорной станции ФИАН, Института сейсмологии РК, Института географии РК и Казахстанской высокогорной геокриологической лаборатории ИМЗ СО РАН.

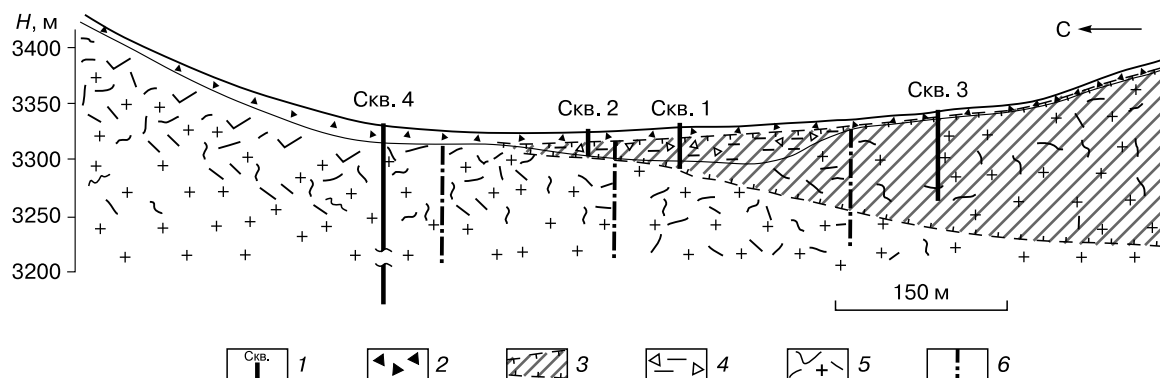


Рис. 1. Геолого-геокриологический профиль перевала.

1 – номера термометрических скважин; 2 – склоновые отложения; 3 – ТМП; 4 – крупноглыбовые моренные отложения с песчано-суглинистым заполнителем; 5 – коренные породы (граниты); 6 – тектонический разлом. H – глубина, м.

Перевал находится в зонах дробления двух смыкающихся тектонических разломов субширотного простирания, секущих перевал в поперечном направлении между долинами рек Проходная и Озерная [Куликовский, 1971; Жданович, 2003]. К этим разломам приурочены зоны дробления (милонитизации) и талики, разделяющие ТМП на отдельные массивы.

Термометрические скважины пройдены в крупнообломочных толщах верхнеплейстоценовых и голоценовых морен мощностью около 20–25 м, подстилаемых коренными гранитными породами. Объемная льдистость морен изменяется от 5 до 40 %, а их криогенные текстуры относятся к порово-массивным и крупношлюзовым [Горбунов, 1996].

Геологическое строение и тектоника перевала Жосалыкезень впервые были отображены на геолого-геофизическом разрезе Л.Г. Филатовым и др. [1967]. На этой основе наши геокриологические исследования позволили выявить общие закономерности в распространении и изменении мощности ТМП на протяжении около 500 м (рис. 1).

На перевале у подножия северного склона мощность ТМП составляет в скв. 3 около 100 м (см. рис. 1, 2). Через 200 м на горизонтальной поверхности седловины перевала в зоне тектонического разлома мощность ТМП уменьшается до 35–40 м (скв. 1). Далее через 80 м ее мощность снижается до 13 м (скв. 2), здесь кроме сейсмогенного фактора на ТМП существенное влияние до 1987 г. оказывало тепловое излучение отапливаемого здания на ленточном фундаменте.

Через 200 м от скважины 2 на склоне южной экспозиции, по данным бурения (скв. 4), ТМП отсутствует (см. рис. 1, 2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С 1974 г. по настоящее время Казахстанской высокогорной геокриологической лабораторией ИМЗ СО РАН в районе перевала круглогодично проводятся систематические наблюдения за температурным режимом ТМП, слоя сезонного протаивания и сезонномерзлых пород, подстилаемого немерзлыми породами. Эти данные являются единственным источником знаний о температурном режиме и динамике многолетней и сезонной мерзлоты не только для рассматриваемого региона, но и в целом для гор Центральной Азии. Гео-термический мониторинг проводится на сети стационарных пунктов наблюдений, охватывающей различные ландшафтные условия в зависимости от экспозиции склонов и состава пород в подпоясе островного и прерывистого распространения ТМП. Для измерения температуры грунтов используются терморезисторные датчики ММТ-4 с точностью измерения до 0,01 °С, которые отлича-

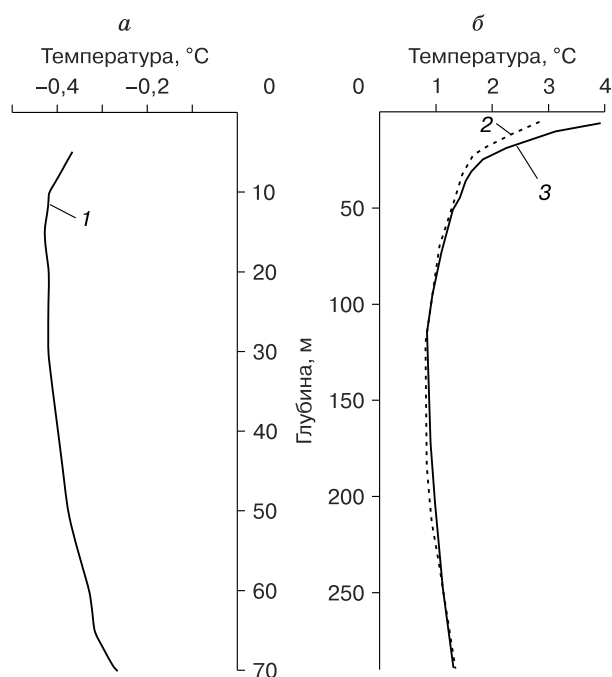


Рис. 2. Распределение температуры горных пород по глубине в скв. 3 (а) и скв. 4 (б) на перевале Жосалыкезень (абс. высота 3330 м).

1 – 22.04.1999 г.; 2 – 09.12.1995 г.; 3 – 05.08.2012 г.

ются надежностью в эксплуатации в течение многих лет.

Геофизические исследования методом вертикальных электрических зондирований в модификации электротомографии (ЭТ) проводились на перевале в 2013 г. В основу технологии ЭТ заложены многоэлектродные измерения и двумерная инверсия данных зондирований. По полученному в результате распределению удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород по разрезу можно судить о геологическом и(или) гео-криологическом строении массива. Технология ЭТ отличается от классических вертикальных электрических зондирований высокой пространственной плотностью наблюдения и возможностью двумерного подхода к интерпретации, что позволяет использовать ее для изучения сложно построенных геологических разрезов.

Профиль электрических зондирований проходил вдоль гребня перевала со склона южной на склон северной экспозиции в створе термометрических скважин. Сами скважины находились на расстоянии от 10 м (скв. 1) до 40 м (скв. 2, 3) от оси профиля. Скважина 4 расположена в 110 м перпендикулярно оси профиля. Профиль пересекал участки с естественными условиями и застроенную территорию, на которой проявилось техногенное влияние на ТМП в виде отепляющего дей-

ствия зданий и сооружений. Зондирования выполнялись с помощью многоэлектродной электро-разведочной станции “Скала-48” [Балков и др., 2014]. Измерения осуществлялись последовательно-ностью подключенных электродов, соответствующей симметричной установке Шлюмберже с максимальными разносами питающей линии 235 м, что обеспечивало глубинность исследований 35–40 м. Инверсия разреза кажущегося сопротивления проводилась в программе Res2Dinv [Loke, 2010].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В начальный период наблюдений (1974 г.) в районе перевала Жосалыкезень температура ТМП на глубине нулевых годовых амплитуд (13–17 м) в скважинах изменялась от $-0,4$ до $-0,8$ °C. В дальнейшем за 20-летний период их температура во всех скважинах повысилась на $0,2$ – $0,5$ °C [Горбунов, 1996]. С 1995 по 2008 г. температура здесь с незначительными колебаниями удерживалась в пределах $-0,20$... $-0,25$ °C. Пример изменений температурного режима ТМП на глубине 20 м за указанный период приведен на рис. 3.

За последние 16 лет происходило синхронное незначительное (в пределах $0,1$ °C) колебание температуры ТМП на различных глубинах (10, 15, 20, 25 м) с периодичностью 10–11 лет. Такой цикл зафиксирован с 1998 по 2008 г. В 2008–2010 гг. отмечено повышение температуры ТМП на $0,13$ – $0,15$ °C – от $-0,28$ °C в 2008 г. до $-0,13$ °C в 2011 г. Со второй половины 2011 г. вновь отмечено пони-

жение температуры до $-0,20$ °C. Отметим, что мощность ТМП здесь за весь период наблюдений оставалась практически неизменной – около 35–40 м.

В целом за 38-летний период отмечается слабый восходящий тренд ($0,01$ °C/год) в температурном режиме ТМП. При сохранении этого тренда можно предполагать, что в ближайшие 20–30 лет ТМП будет иметь практически безградиентный термический режим и близкую к нулю температуру.

Климатические условия в районе перевала в начальный период наблюдений (1973–1975 гг.) характеризовались следующими показателями: средняя годовая температура воздуха $-3,9$ °C, январская $-14,2$ °C и августовская $+6,4$ °C. К 2003 г. эти значения температуры увеличились на $0,4$, $0,5$ и $0,3$ °C соответственно, т. е. градиент повышения температуры здесь составил $0,01$ – $0,02$ °C/год. Продолжительность теплого периода около 125 сут. Безморозный период отсутствует и даже в июне возможны заморозки до -5 ... -6 °C. Устойчивый снежный покров формируется в октябре и сохраняется до начала июня. За счет интенсивной ветровой деятельности образуется неоднородный снежный покров, высота и плотность которого значительно изменяются от места к месту в зависимости от экспозиции и шероховатости поверхности склонов.

Отметим, что в высокогорье Северного Тянь-Шаня за последние 70 лет наблюдается потепление климата. Тренд изменения средней годовой температуры воздуха на метеостанциях Туюксу-1

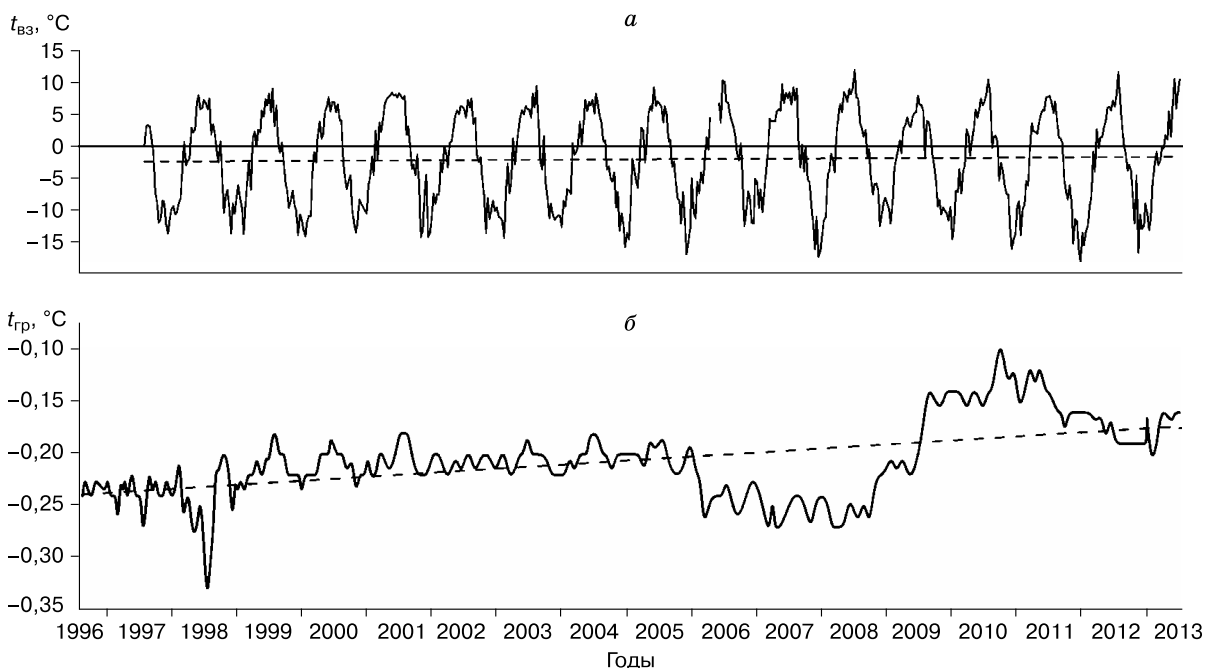


Рис. 3. Изменение температуры воздуха $t_{вз}$ (а) и ТМП $t_{гп}$ (б) в скв. 1 на глубине 20 м.

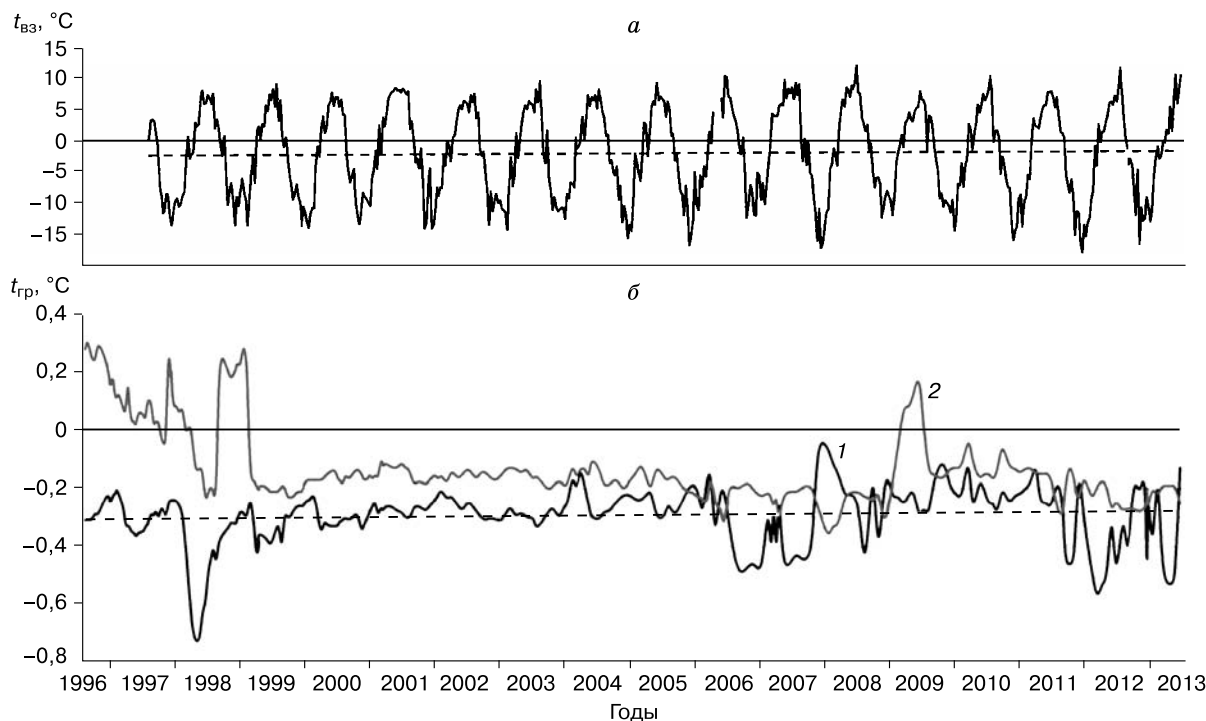


Рис. 4. Изменение температуры воздуха $t_{вз}$ (а) и ТМП $t_{гр}$ (б) в скв. 2 на глубине 8,3 м (1) и 12,2 м (2).

(абс. высота 3450 м) и Мынжылки (абс. высота 3017 м) за указанный период составил $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ [Пивень, 2007].

На термический режим и мощность ТМП определенное воздействие оказывает сейсмогенный фактор. В северо-тянь-шаньском сейсмоактивном регионе систематически происходят ощутимые землетрясения, что может сопровождаться повышением плотности теплового потока из недр земли по тектоническим разломам. В частности, наиболее вероятной причиной незначительной мощности ТМП – 12–13 м в районе скв. 2 (см. рис. 1) и 35–40 м в районе скв. 1 – является их расположение вблизи тектонических разломов. Кроме того, здесь отмечается эпизодическое повышение температуры вплоть до положительных значений вблизи подошвы на глубине 12,2 м во время повышенной сейсмической активности (рис. 4).

Например, в октябре 2011 г. и январе 2013 г., через 2–3 дня после землетрясений интенсивностью 2 и 4 балла по шкале MSK-64, по данным Института сейсмологии РК здесь температура повышалась на $0,10\text{--}0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$. В последующем вследствие затухания сейсмической активности температура на этой глубине вновь понижалась и практически восстанавливалась до значений, отмеченных перед землетрясением ($-0,27$ и $-0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Изменение мощности ТМП и характера ее строения отчетливо проявляется на геоэлектрическом разрезе (рис. 5, а).

Сплошная ТМП на склоне северной экспозиции характеризуется высокими значениями УЭС $\rho = 4500\text{--}11\,000\text{ Ом}\cdot\text{м}$. При этом максимуму УЭС соответствует ТМП с минимальной температурой на глубине 10–15 м, установленной по данным термокаротажа скв. 3 (см. рис. 2, а). Мощность слоя высокого УЭС превышает глубинность исследований.

По мере продвижения профиля по направлению к склону южной экспозиции (с юга на север) УЭС ТМП понижается до $2000\text{--}5000\text{ Ом}\cdot\text{м}$, геоэлектрический разрез становится невыдержанным, а в области тектонического нарушения наблюдается уменьшение мощности высокоомного слоя. Уменьшение ρ связано с ростом температуры ТМП, вызванной как сменой экспозиции склона, так и, возможно, повышенным тепловым потоком из недр земли по разлому.

На горизонтальной поверхности седловины в зоне тектонического разлома слой высокого сопротивления, ассоциируемый с ТМП, становится фрагментарным, что отражает островное распространение ТМП (см. рис. 5, а). Величина ρ здесь меняется от 780 до $5000\text{ Ом}\cdot\text{м}$ в зависимости от литологического состава, температуры и льдистости. В основании разреза породам с сопротивлением порядка $50\text{ Ом}\cdot\text{м}$ соответствуют милониты зоны дробления, так как только присутствием глинистой фракции можно объяснить такое низкое значение УЭС горных пород. На склоне южной экспозиции

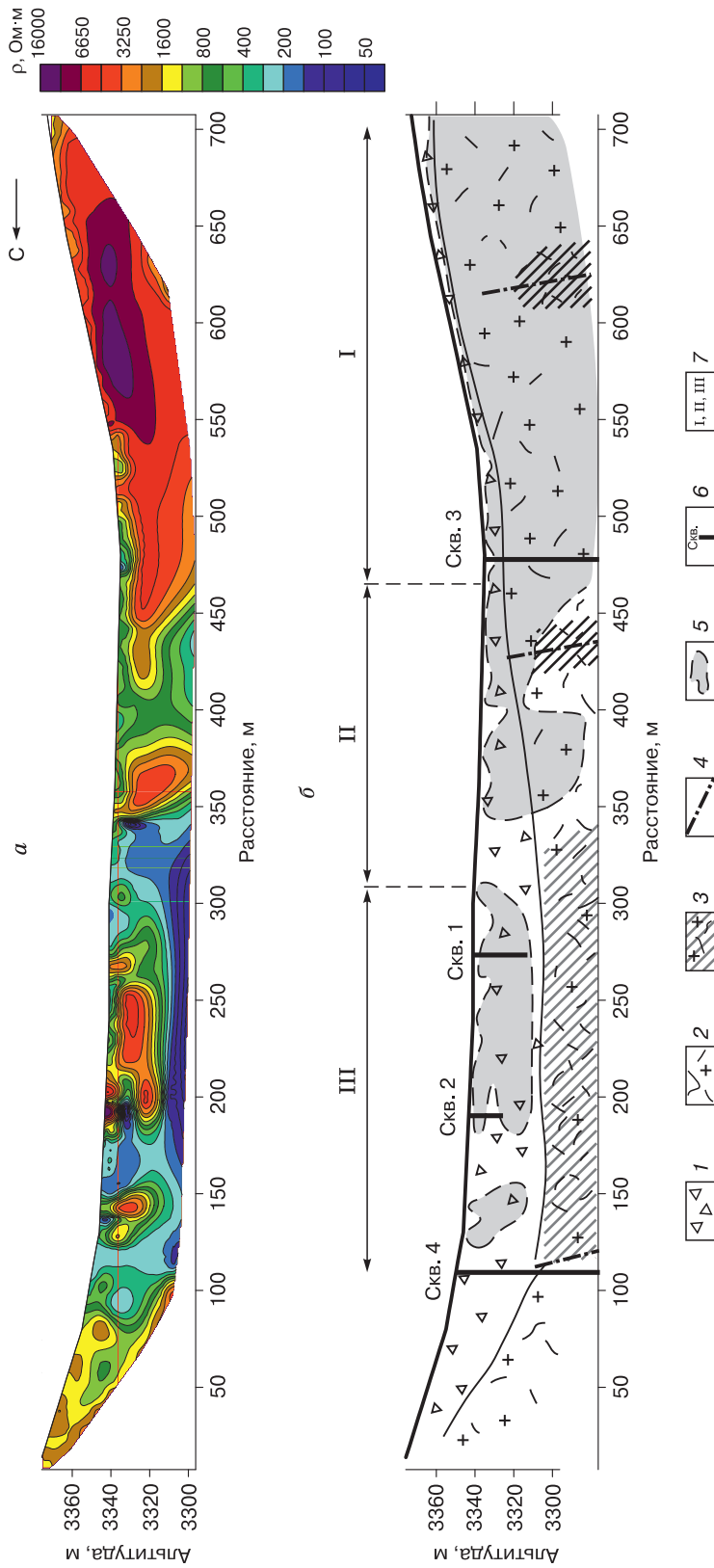


Рис. 5. Геоэлектрический разрез перевала Жосалыкзень (а) и его интерпретация (б):

1 – склоновые и моренные отложения; 2 – трещиноватые граниты; 3 – зоны дробления и милонитизации; 4 – тектонические нарушения; 5 – ТМП; 6 – проекция термометрических скважин на профили; 7 – участки распространения ТМП различных типов: I – сплошного; II – прерывистого; III – островного.

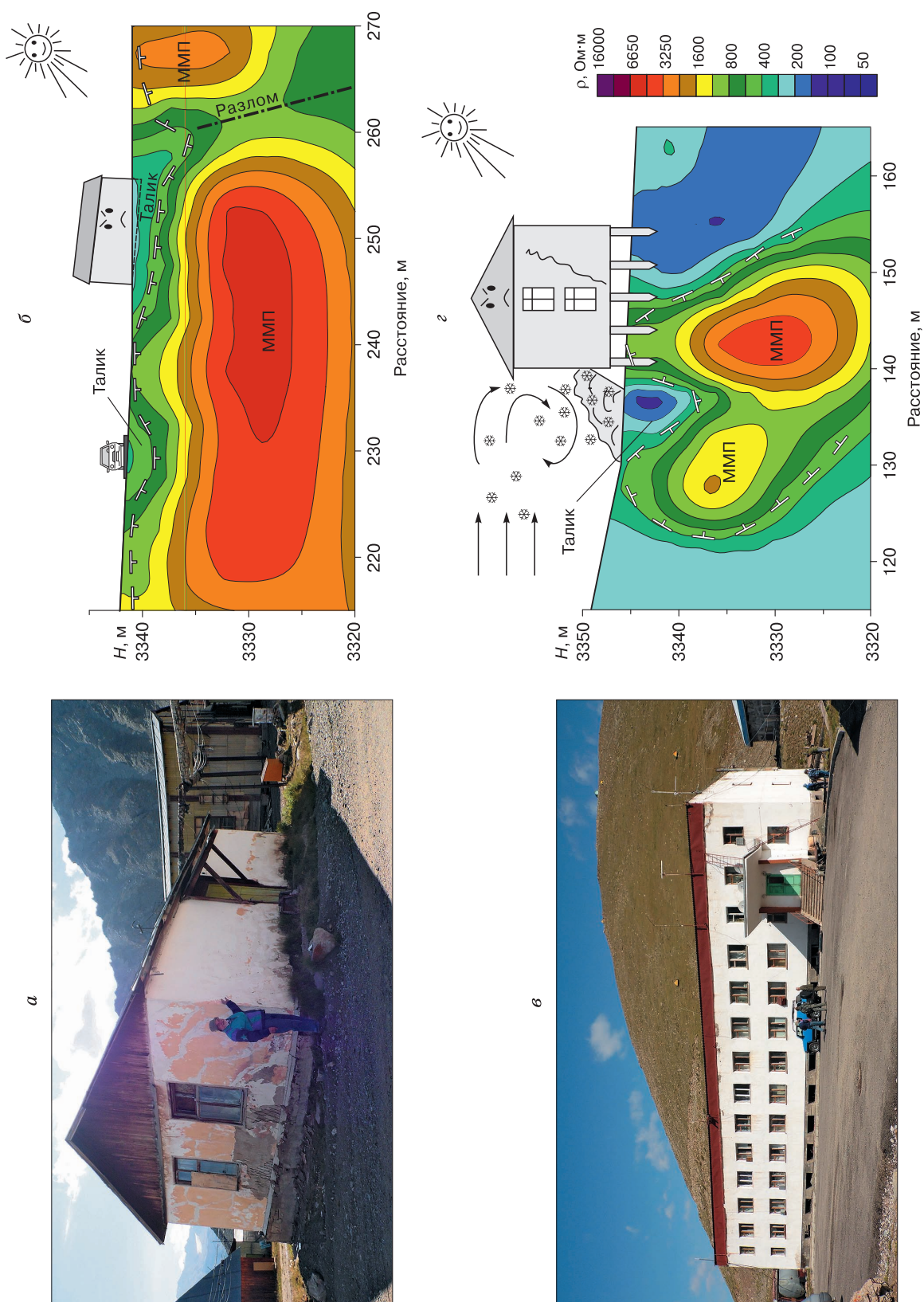


Рис. 6. Деформирующиеся здания, построенные на ТМП на ленточном фундаменте (*a*) и с проветриваемым подпольем (*б*), и геоэлектрические разрезы (*б*, *г*).

зиции УЭС склоновых отложений и трещиноватых гранитов составляет 780–1600 Ом·м, что говорит об их талом состоянии – скв. 4 (см. рис. 1, 2, б).

В соответствии с характером распределения УЭС вдоль линии профиля в направлении с юга на север можно выделить участки сплошного (I), прерывистого (II) и островного (III) типов распространения ТМП (см. рис. 5, б). При этом закономерно изменяется как строение высокоомного слоя (от сплошного типа к прерывистому и островному), так и его УЭС. Общее уменьшение величины ρ высокоомного слоя при смене типа распространения ТМП от сплошного к островному связано с повышением температуры ТМП.

Таким образом, геоэлектрическая модель разреза хорошо согласуется с геокриологическими представлениями о строении ТМП перевала Жосалыкезень, полученными в результате анализа многолетних термометрических данных.

Приведенные выше данные относятся к участкам естественного развития ТМП. Несколько иначе происходило изменение термического режима ТМП на застроенной территории под влиянием хозяйственной деятельности человека. Скважина 2 (см. рис. 1) располагалась на расстоянии около 3 м от отапливаемого кирпичного здания, построенного на ленточном фундаменте без учета ТМП в 70-х гг. прошлого столетия. В процессе эксплуатации здания происходило повышение температуры ТМП и увеличение глубины сезонного слоя, что способствовало формированию под зданием своеобразной чаши протаивания. Это сопровождалось неравномерной осадкой пород при протаивании и появлением существенных деформаций здания с ежегодным нарастанием интенсивности проявления разрушительного эффекта. В итоге здание пришло в негодность и было снесено в 1986–1987 гг.

После прекращения отепляющего воздействия здания началась агградация ТМП к естественным условиям. С 1995 г. по настоящее время температура здесь удерживается в пределах $-0,2...-0,3$ °C (см. рис. 4), что аналогично температурному режиму ТМП в естественных условиях (см. рис. 3).

Напротив снесенного здания в настоящее время претерпевает деформации одноэтажное строение на ленточном фундаменте (рис. 6, а). Наибольшая просадка грунтов основания отмечается со стороны южной экспозиции сооружения, где происходит максимальный нагрев стены. Кроме того, близость тектонического нарушения обуславливает температуру ТМП около 0 °C, поэтому малейшее изменение теплового баланса приводит к деградации ТМП в основании. На геоэлектрическом разрезе проявляется геокриологическая обстановка в основании здания и на прилегающей

территории (см. рис. 6, б). В приповерхностной части разреза под зданием асимметричной областью пониженного УЭС выделяется талик. При этом размеры области пониженных УЭС (мощность талика) увеличиваются в сторону максимальной просадки здания. Еще одна локальная аномалия низкого УЭС, интерпретируемая как талик, отмечается под асфальтированной площадкой и автомобильной дорогой (см. рис. 6, б). Ниже по разрезу грунты характеризуются высокими значениями $\rho = 800-5000$ Ом·м, что говорит об их мерзлом состоянии.

Другое здание, построенное по I принципу (с сохранением ТМП) на свайном фундаменте с проветриваемым подпольем, также подвержено деформациям (см. рис. 6, в). Они проявляются на фасаде в виде трещин оседания шириной раскрытия до 2 см. Возникновение деформаций этого здания может быть связано как с разной несущей способностью грунтов в его основании, так и с сейсмическими воздействиями. Вполне вероятно, что оба этих фактора комплексно влияют на устойчивость здания. Со стороны бокового фасада здания проходил профиль ЭТ, фрагмент геоэлектрического разреза по которому представлен на рис. 6, з. На разрезе высокоомной аномалией выделяется ТМП. При этом форма аномалии отражает влияние локальных факторов на строение ТМП.

Под зданием со стороны северной экспозиции отмечается поднятие высокоомной области к поверхности, что, возможно, отражает новообразование ТМП в проветриваемом подполье с теневой стороны. В то же время с южной (солнечной) стороны здания грунты характеризуются низкими значениями $\rho = 100-200$ Ом·м и интерпретируются как талые. Талые и мерзлые породы в основании здания имеют разные физико-механические характеристики, что при сейсмическом воздействии может приводить к неравномерным деформациям конструкции и возникновению трещин. С наветренной стороны здания устроен снегозаградительный щит, препятствующий заносу проветриваемого подполья. В зимний период вдоль стены аккумулируется большое количество снега – до 3–4 м. Снеговой нанос вызывает отепляющее действие, в результате чего формируется талик, ярко выраженный локальной аномалией низкого УЭС на геоэлектрическом разрезе (см. рис. 6, в).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Действие сейсмогенного фактора на увеличение температуры и уменьшение мощности ТМП отмечено во Внутреннем Тянь-Шане на северо-западном макросклоне хр. Ак-Шыйрак. Здесь за пределами тектонического разлома плейстоценовые моренные отложения на высоте 4070–4030 м

проморожены на 240 м и имеют температуру $-4,3^{\circ}\text{C}$. В скважинах, расположенных в зоне тектонического разлома, высокая плотность глубинных тепловых потоков повышает температуру пород до $-2,2^{\circ}\text{C}$ и значительно (до 145 м) уменьшает мощность ТМП [Горбунов, 1996].

Влияние тектоники на морфологию ТМП подтверждается материалами специальных исследований и в других сейсмоактивных горных регионах. Так, в Чуйской впадине (Горный Алтай), ширина которой составляет около 30 км, по данным бурения и геоэлектрического зондирования в 1977 г. было установлено, что в зоне тектонического разлома глубина залегания подошвы ТМП находилась на глубине 73 м. После землетрясения 2003 г. с магнитудой 7,3 мощность ТМП уменьшилась до 30 м за счет деградации ее со стороны подошвы под влиянием повышенного теплового потока по тектоническому разлому из недр земли [Оленченко и др., 2011]. Влияние тектонического фактора на геологическое строение и криолитозону отмечено и в южных районах Якутии [Булдович и др., 1976].

Результаты электрических зондирования на перевале Жосалыкезень показали, что горизонт высокого УЭС, ассоциируемый с ТМП, в узле пересечения тектонических нарушений имеет пониженную мощность и прерывистое или островное строение. Зафиксированное в термометрических скважинах повышение температуры горных пород в период землетрясений дает основание полагать, что сокращение мощности и островной тип строения ТМП в седловине Жосалыкезень связаны с отепляющим действием теплового потока по разлому.

Бесспорно, что влияние тектонического фактора на строение ТМП перевала накладывается на эффект от смены экспозиции склона с северной на южную. По данным электрического зондирования (см. рис. 5), на фоне общего уменьшения мощности ТМП при смене экспозиции склона отмечаются локальные изменения в строении мерзлой толщи в зонах тектонических нарушений.

Антропогенное влияние является другим локальным фактором, определяющим строение ТМП перевала Жосалыкезень. Так, отепляющее действие здания, построенного на ленточном фундаменте, привело к формированию талика в высокотемпературной мерзлой толще зоны разлома, что, в свою очередь, стало причиной деформации здания (см. рис. 6, а, б). Если искусственные сооружения способствуют накоплению снега, это также может привести к формированию таликов в мерзлой толще (см. рис. 6, в). В то же время условия вентилируемого подполья благоприятствуют новообразованию мерзлой толщи. Таким образом, малейшие изменения радиационно-теплового баланса в ту

или иную сторону могут привести как к деградации, так и к агградации ТМП.

ВЫВОДЫ

Геотермические наблюдения в районе перевала Жосалыкезень за последние 38 лет выявили слабую реакцию ТМП на современное потепление климата: восходящий тренд в температурном режиме ТМП составил $0,01^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Это свидетельствует о довольно высокой термической устойчивости ТМП Северного Тянь-Шаня к климатическим изменениям.

Установлено влияние локальных факторов на распространение, температуру и мощность ТМП перевала. К таким факторам относятся экспозиция склона, разломная тектоника и антропогенное воздействие.

При изменении экспозиции склона с северной на южную отмечается закономерная смена типа распространения ТМП. Сплошная ТМП на склоне северной экспозиции характеризуется высокими ($4500\text{--}11\,000\text{ Ом}\cdot\text{м}$) значениями УЭС и мощностью около 100 м. На южном склоне, по данным бурения, ТМП отсутствует, что подтверждается низкими значениями УЭС ($780\text{--}1600\text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Влияние тектоники в зоне пересечения разломов на горизонтальной поверхности седловины перевала обуславливает прерывистый и(или) островной характер распространения ТМП. Геоэлектрический разрез становится невыдержанным, УЭС изменяется от 780 до $5000\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Здесь же отмечается рост температуры на подошве ТМП вплоть до положительных значений в период повышенной сейсмической активности, а мощность ТМП уменьшается от 40 до 13 м.

Воздействие антропогенного фактора на строение ТМП перевала Жосалыкезень выражается в повышении температуры и увеличении глубины сезонноталого слоя под отапливаемыми зданиями, построенными на ленточном фундаменте без учета ТМП, что способствует формированию под ними своеобразных чаш протаивания и таликов, выделяющихся на геоэлектрических разрезах аномалиями пониженного УЭС.

Формирование талика отмечается по геофизическим данным и в пределах снегозаградительного устройства, где снеговой нанос вызывает отепляющее действие.

Признаки новообразования ТМП отмечены под зданием на свайном фундаменте с проветриваемым подпольем, где зафиксировано увеличение УЭС грунтов в приповерхностном слое.

Таким образом, современные геофизические исследования позволили выявить особенности морфологии ТМП перевала Жосалыкезень и оценить влияние локальных факторов на их строение.

Особенности строения высокогорной ТМП, в частности ее локальность, дают возможность проводить исследования и мониторинг состояния ТМП всех типов распространения на относительно небольшой территории. С этой точки зрения перевал Жосалыкезень является полигоном для организации и проведения геофизических, геотермических и геокриологических наблюдений за состоянием и динамикой ТМП и сезонномерзлых пород в различных ландшафтных условиях, в том числе в рамках научного туризма. Такие исследования позволят выявить и оценить влияние различных локальных факторов на современное состояние высокогорной криолитозоны и разработать сценарии ее развития в будущем в связи с климатическими изменениями и все возрастающими техногенными нагрузками на горные экосистемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-05-00435 А).

Литература

- Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А.** Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nemfis.ru/pdf/etom.pdf> (дата обращения: 09.03.2014).
- Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С.** Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлот. исслед., 1976, вып. XV, с. 120–125.
- Горбунов А.П.** Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира / А.П. Горбунов, Э.В. Северский, С.Н. Титков. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1996, 194 с.
- Жданович А.Р.** Большое Алматинское озеро и сейсмодеструкционно-вбросовая гипотеза его формирования // Изв. РАН. Сер. геол., 2003, № 6, с. 94–108.
- Куликовский К.Т.** О происхождении горных озер в бассейнах рек Иссык и Большой Алматинки и их селезащитной роли // Материалы по геологии и полезным ископаемым. Алма-Ата, Наука, 1971, вып. 4 (29), с. 259–271.
- Оленченко В.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. и др.** Распространение толщи мерзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 15–22.
- Пивень Е.Н.** Современные изменения климата гляциально-нивальной зоны Юго-Восточного Казахстана (по данным режимных наблюдений) // Терра, 2007, № 2, с. 52–61.
- Филатов Л.Г., Ровенский М.И., Тузов В.А., Гуленин Н.Е.** Методика комплексных геофизических исследований при решении гидрологических и инженерно-геологических задач в селеопасных районах Большой и Малой Алматинки // Материалы семинара по применению географических и математических методов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. М., 1967, вып. 5, с. 159–171.
- Loke M.H.** Tutorial. RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia, Geotomo Software, 2010, 148 p.

Поступила в редакцию
3 апреля 2014 г.