

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 550.837

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТОЛЩИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД
В ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)
ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

В.В. Оленченко, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов,
Е.В. Поспеева, В.В. Потапов, А.Н. Шейн, С.М. Стефаненко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптыга, 3, Россия, OlenchenkoVV@ipgg.nsc.ru, KozhevnikovNO@ipgg.nsc.ru*

Представлены и обсуждаются результаты электромагнитных зондирований в зоне распространения многолетнемерзлых пород в Чуйской впадине Горного Алтая. На основе сопоставления данных геофизических исследований 2009 г. с результатами бурения 1970-х гг. выявлено резкое сокращение мощности многолетнемерзлых пород, предположительно связанное с образованием таликов гидрогеогенного типа, и установлены признаки нарушения высотной зональности в строении толщи многолетнемерзлых пород.

Горный Алтай, многолетнемерзлые породы, электромагнитные зондирования

DISTRIBUTION OF PERMAFROST IN CHUISKAYA BASIN (GORNYY ALTAI)
ACCORDING TO TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS DATA

V.V. Olenchenko, N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov,
E.V. Pospeeva, V.V. Potapov, A.N. Shein, S.M. Stefanenko

*Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
630090, Novosibirsk, prosp. Acad. Koptiyuga, 3, Russia, OlenchenkoVV@ipgg.nsc.ru*

The results of electromagnetic soundings in the area of permafrost in Chuiskaya basin (Gorny Altai) are presented and discussed in this article. A sharp decrease in permafrost has been revealed based on the comparison of data of geophysical researches in 2009 with the results of drilling during 1970th. This decrease had occurred presumably due to the formation of the taliks of hydrogeogenic type. Features of disturbance of altitudinal zonality in the permafrost structure have been determined.

Gorny Altai, permafrost, electromagnetic sounding

ВВЕДЕНИЕ

Электроразведочные методы геофизики широко применяются при решении геокриологических задач, таких как определение мощности толщи многолетнемерзлых пород (ТМП), картирование островной мерзлоты, выделение таликовых зон и ряда других. Однако в пределах Чуйской впадины целенаправленных исследований ТМП геофизическими методами не проводилось. Большой объем электромагнитных зондирований здесь был выполнен в 70–80-е гг. прошлого века при поисках полезных ископаемых и геологическом картировании, новейшие же исследования выполняются преимущественно с целью изучения глубинного строения региона в связи с его высокой сейсмичностью [Неведрова, Антонов, 2004; Неведрова и др.,

2005а,б; Неведрова, Поспеева, 2009]. При этом ТМП рассматривается как “обычный” элемент верхней части геологического разреза (ВЧР) без учета закономерностей их распределения и связи с геоморфологией. Немногочисленные вертикальные электрические зондирования с небольшими разносами и термометрические исследования, проводимые при изысканиях под строительство зданий в населенных пунктах Чуйской долины, характеризуют лишь отдельные, локальные участки криолитозоны на глубину 10–30 м. В 2009 г. были выполнены комплексные электромагнитные зондирования для оценки современных геокриологических условий Чуйской впадины Горного Алтая.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Чуйская высокогорная впадина находится в юго-восточной части Горного Алтая. В геотектоническом отношении район работ расположен в пределах Ануйско-Чуйской геотектонической зоны Алтае-Салаирской складчатой системы. В геологическом строении района работ принимают участие породы палеозойского возраста (метаморфизованные песчаники, известняки, сланцы, туфы), перекрытые рыхлыми осадками палеогена, неогена и четвертичными образованиями. Мощность неоген-четвертичных отложений в центре впадины достигает 1000 м [Конищев и др., 2005].

Согласно схематической геокриологической карте Алтае-Саянской горной страны [Шац, 1978], район работ относится к зоне развития островной многолетней мерзлоты. Мерзлотно-гидрогеологическое строение Чуйской впадины изучалось в 1970-х гг. Чуйской партией гидрогеологической экспедиции 15-го района [Мерзлотно-гидрогеологическая карта..., 1977]. По результатам этих изысканий были составлены мерзлотно-гидрогеологическая и инженерно-геологическая карты Чуйской и Курайской впадин. Установлено, что в пределах Чуйской впадины ТМП имеет сплошное распространение. Ее мощность на тот момент составляла 6–90 м, а кровля ТМП залегала на глубине 3–7 м. Отмечалось присутствие несквозных и внутримерзлотных таликов, а в долине р. Чуя наблюдались проявления таких криогенных процессов, как пучение, термокарст и морозобойное растрескивание.

Положение одного из буровых профилей, вдоль которого проводились геофизические исследования, представлено на рис. 1. Данные бурения позволяют составить общее представление о

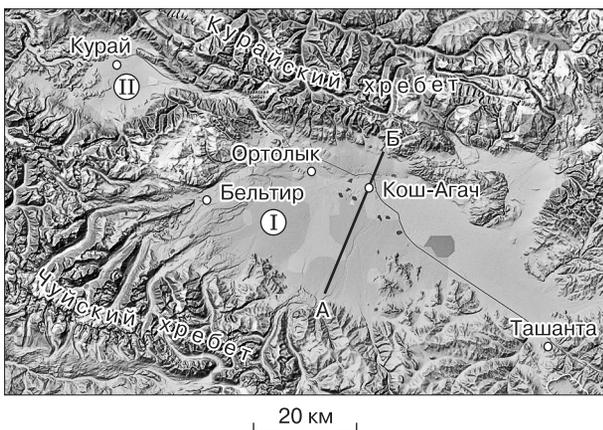


Рис. 1. Схема района работ:

I – Чуйская впадина; II – Курайская впадина; АБ – буровой профиль (1977 г.).

геологическом строении Чуйской впадины и геокриологической обстановке (рис. 2). Сверху залегают флювиогляциальные и аллювиально-пролювиальные отложения мощностью от 10 до 110 м, представленные валунами, галечниками с супесчаным и суглинистым заполнителем. Ниже располагаются озерно-аллювиально-пролювиальные отложения мощностью 30–75 м в виде галечников с супесчаным и суглинистым заполнителем, подстилаемые неогеновыми глинами и суглинками с прослоями песков и углей мощностью более 200 м. Борты впадины выполнены породами палеозойского возраста – алевритами, песчаниками, известняками, метаморфическими сланцами, туфами. Мощность ТМП в центральной части впадины достигала 60–75 м с уменьшением по направлению к бортам до 10–15 м и последующим выклиниванием. Считалось, что подошва ТМП в схеме повторяет рельеф земной поверхности [Шац, 1978].

На инженерно-геологическом разрезе указаны значения удельного электрического сопротивления (УЭС) пород по данным каротажа. Максимальными сопротивлениями характеризуются мерзлые породы, их УЭС изменяется от 2000 до 5500 Ом-м в зависимости от типа заполнителя валунно-галечниковых отложений. Тип заполнителя влияет и на сопротивление нижележащих талых галечников, их УЭС изменяется от 400 до 1900 Ом-м. Залегающие в основании разреза неогеновые глины и суглинки имеют сопротивление 25–105 Ом-м, которое зависит от их гранулометрического состава.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения геоэлектрического разреза по линии АБ (см. рис. 2) использовались зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Метод ЗСБ позволил исследовать разрез в интервале глубин от первых десятков до первых сотен метров, тогда как с помощью метода ВЭЗ удалось изучить верхнюю (до 100 м) часть разреза.

Для возбуждения и измерения индукционных переходных процессов применялась быстродействующая аппаратура Fast Spar, выпускаемая ООО НПК “Сибгеосистемы”. Размер генераторной петли составлял 100 × 100 м, приемная петля размером 25 × 25 м размещалась в центре генераторной.

Для работ методом ВЭЗ использовалась аппаратура МЭРИ-24 с генератором Астра-100 производства ООО “Северо-запад”. Максимальный разнос между питающими электродами составлял 250 м. Измерения выполнялись при частоте 2,44 Гц.

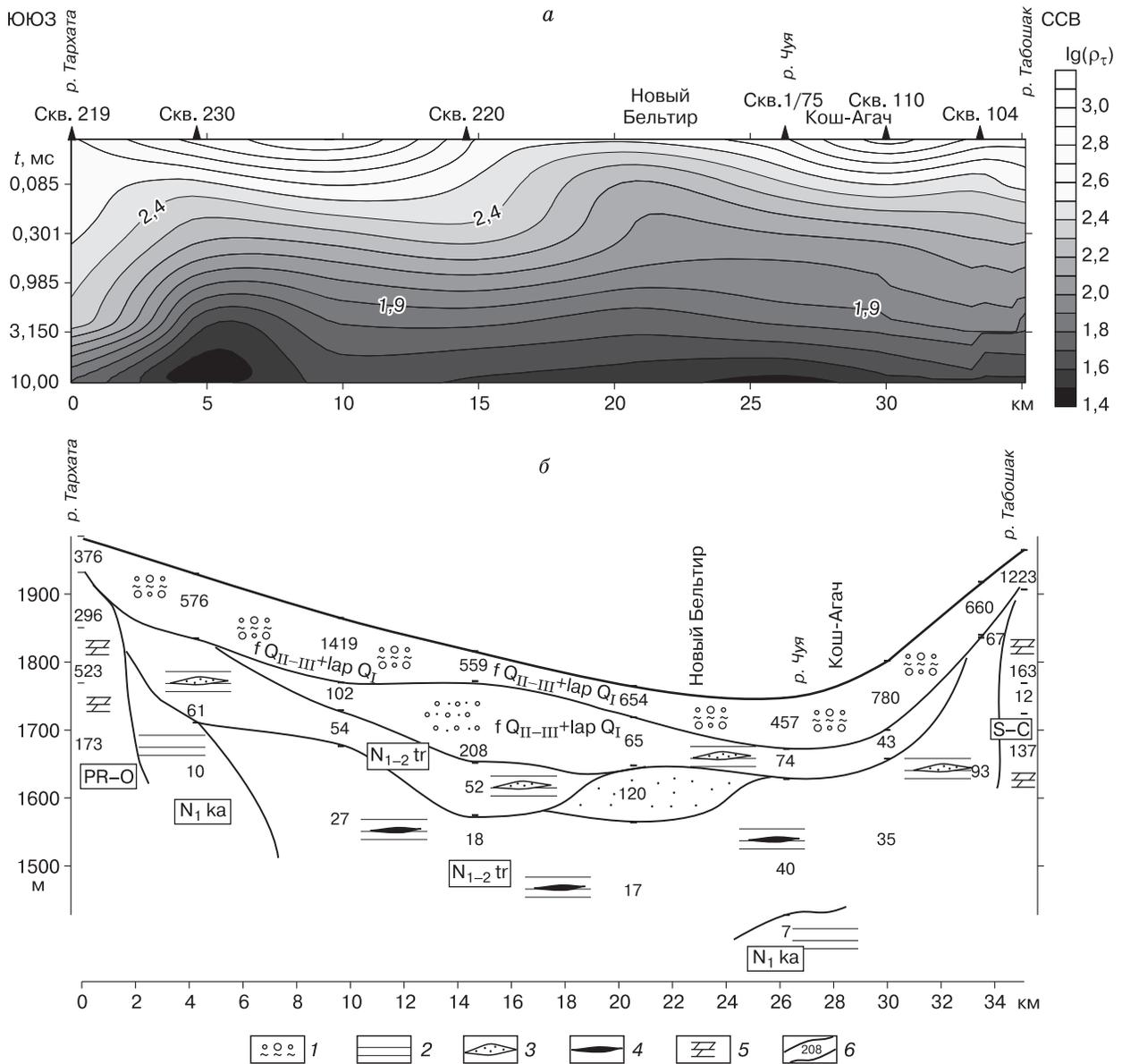


Рис. 3. Разрез кажущихся сопротивлений ρ_{τ} (а) и геоэлектрический разрез (б) по данным метода ЗСБ:

1 – гравийно-галечниковые отложения, 2 – глины, 3 – пески, 4 – уголь, 5 – скальные породы, 6 – геоэлектрические границы и УЭС слоя, Ом·м.

нии разреза в качестве параметра, контролирующего изучаемую глубину, использовалась временная задержка, на которой измерена ЭДС переходного процесса. В первом приближении разрез представлен двухслойной ($\rho_2 < \rho_1$) моделью с проводящим основанием и разной мощностью первого слоя на флангах и в центральной части профиля.

На следующем этапе с помощью программы “ТЕМ-IP” для автоматического подбора оптимальной одномерной модели среды [Антонов и

др., 2010] была выполнена инверсия данных ЗСБ. Как известно, с помощью индукционных зондирований вследствие H -эквивалентности глубина до кровли проводящих слоев, перекрытых относительно менее проводящими образованиями, может быть определена с высокой точностью [Матвеев, 1990]. Это явилось одним из факторов, который обеспечил высокую эффективность метода ЗСБ при решении поставленной задачи.

Геоэлектрический разрез Чуйской впадины с элементами геологической интерпретации, по-

строенный по результатам инверсии данных метода ЗСБ и априорной геологической информации (см. рис. 2), показан на рис. 3, б.

В основных чертах геоэлектрическая модель согласуется с инженерно-геоэлектрическим разрезом, построенным по данным бурения, тем не менее есть и отличия. Так, по данным бурения, верхняя часть разреза состоит из двух слоев – мерзлого флювиогляциального валунно-галечникового и подстилающего его озерно-аллювиально-пролювиального гравийно-галечникового с песчаным и/или супесчаным заполнителем. В то же время, по данным ЗСБ, верхняя часть разреза представлена одним слоем мощностью 60–80 м с сопротивлением 450–1400 Ом·м, подошву которого можно интерпретировать как подошву ТМП.

Залегающие ниже четвертичных отложений неогеновые глины уверенно дифференцируются по сопротивлению. Верхняя часть толщи туерькской свиты (N_{1-2tr}) до глубины 150–200 м характеризуется повышенным сопротивлением (40–70 Ом·м) по отношению к ее нижним горизонтам (17–40 Ом·м). Вероятно, это связано с особенностями осадконакопления верхних горизонтов свиты, выражающимися в увеличении количества песчаных прослоев в глине. Другое возможное объяснение заключается в том, что с глубиной количество песчаных прослоев уменьшается, вследствие чего УЭС свиты понижается.

По сравнению с глинами туерькской свиты залегающие в основании разреза неогеновые глины кошагачской свиты (N_{1ka}) характеризуются еще более низким сопротивлением (7–10 Ом·м).

Аналогичная закономерность наблюдается и на инженерно-геологическом разрезе (см. рис. 2), где указаны сопротивления пород, определенные по данным каротажа.

Палеозойские породы, слагающие борта депрессии, неоднородны по удельному электрическому сопротивлению, что может быть связано как с разным литологическим составом (метаморфизованные аргиллиты, песчаники, сланцы, туфы), так и с различной степенью трещиноватости, развитой по тектоническим нарушениям. Величина УЭС этих пород меняется в пределах 130–500 Ом·м.

Вертикальные электрические зондирования. На рис. 4 приведен геоэлектрический разрез, построенный по результатам одномерной инверсии данных ВЭЗ, которая была выполнена с помощью программы IPI2win. Геоэлектрический разрез позволяет судить о строении исследуемой толщи практически от дневной поверхности до глубины порядка 80 м. Толща многолетнемерзлых пород (ММП) четко выделяется высокими значениями УЭС (600–30 000 Ом·м). В целом распространение ТМП Чуйской впадины, ширина которой составляет около 30 км, характеризуется теми же особенностями, что и толщи ММП межгорных впадин Забайкалья и Якутии: максимальная мощность ТМП приурочена к тальвегу долин. Она уменьшается по направлению к бортам депрессии на склонах южной экспозиции и увеличивается на склонах северной экспозиции. Аналогичная зональность, но проявленная в больших масштабах, наблюдается и в Чуйской впадине. Максимальная

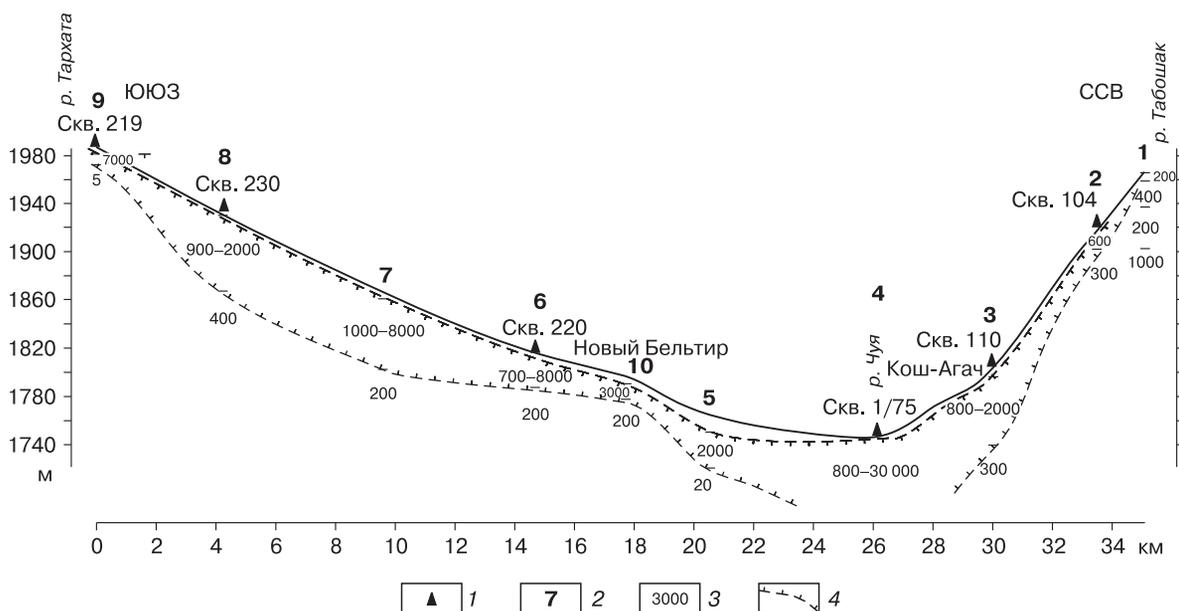


Рис. 4. Геоэлектрический и геокриологический разрезы Чуйской впадины по данным ВЭЗ:

1 – скважины, 2 – точки ВЭЗ и их номера, 3 – УЭС пород, Ом·м, 4 – граница многолетнемерзлых пород.

мощность мерзлоты (65–80 м) отмечается в тальвеге долины р. Чуя (ВЭЗ № 4, скв. 1/75) и на склоне северо-северо-восточной экспозиции (ВЭЗ № 7, 8, скв. 230). На бортах долины мощность ТМП снижается до 10–15 м, а в районе ВЭЗ № 1 на высоте 1983 м над уровнем моря, по данным электроразведки, ТМП нет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из неожиданных результатов выполненных исследований является сходство геокриологического строения Чуйской впадины и межгорных впадин Забайкалья, для которых характерно уменьшение мощности ТМП на бортах долин с последующим их исчезновением на водоразделах за счет эффекта температурной инверсии [Мерзлотоведение, 1981]. Известно, что в горах Алтая распространение ТМП контролируется высотной поясностью [Геокриология..., 1989]. Граница сезонного промерзания в восточной части горной страны проходит на высоте 600–1200 м, при возрастании высоты увеличивается сплошность ТМП. На некоторых хребтах мощность ТМП достигает 2000 м и более. В высокогорных частях температура горных пород понижается с высотой, и в пределах водоразделов они охлаждены больше, чем в долинах рек. Логично предположить, что мощность ТМП с ростом высоты должна увеличиваться. На самом деле, по данным бурения и геофизических съемок, мощность ТМП в Чуйской впадине по мере продвижения от ее центра к периферии уменьшается. Таким образом, в Чуйской впадине наблюдается более сложная зависимость распространения ТМП от высоты. Скорее всего, это связано со спецификой местных условий теплообмена, которые приводят к возникновению эффекта температурной инверсии, т. е. к увеличению температуры с высотой вместо ее понижения. Можно предположить, что при дальнейшем повышении высотных отметок местности мощность ТМП должна возрастет. Возможно, по контуру долины (горного обрамления) существует полоса малой мощности ТМП, но данное предположение необходимо проверить специальными исследованиями.

Еще один интересный вывод вытекает из сопоставления данных о ТМП, полученных в результате исследований 2009 г., с инженерно-геологическим разрезом, построенным в 1977 г. Так, в 1977 г., по данным бурения скважины 220, подошва ТМП отмечалась на глубине 73 м, а в 2009 г., по результатам интерпретации ВЭЗ № 7, мощность ТМП составляла всего 30 м.

Расхождение между данными ВЭЗ и бурения более чем в два раза едва ли может рассматриваться как случайное. Можно было бы попытаться “списать” его на проявление эквивалентности, однако специальный анализ результатов моделиро-

вания полевой кривой ВЭЗ № 7, выполненный средствами программы IPI2win, показал, что полученные оценки мощности и глубины залегания подошвы ТМП близки к истинным.

По данным каротажа сопротивлений, выполненного в 1977 г., была рассчитана синтетическая кривая ВЭЗ, которая вместе с полевой кривой, построенной по результатам измерений 2009 г., приведена на рис. 5.

Кривые схожи, но максимум кажущегося удельного сопротивления ρ_k на синтетической кривой наблюдается при разносе АВ/2 = 68 м, а на полевой кривой – при 25 м. С учетом того, что максимальные значения ρ_k для обеих кривых не различаются, отмеченный сдвиг отражает тот факт, что с 1977 по 2009 г. мощность высокоомного горизонта, идентифицируемого как многолетнемерзлые породы, уменьшилась.

Сокращение мощности ТМП наблюдается и на северо-северо-восточном фланге профиля, в районе скважины № 104. В 1977 г. мощность ТМП составляла здесь 75 м, тогда как, по данным ВЭЗ 2009 г., подошва высокоомного слоя располагалась на глубине 20 м, а его мощность составляла всего 13 м.

Таким образом, есть основания говорить об уменьшении мощности ТМП за счет деградации мерзлых пород со стороны подошвы. Наиболее вероятная причина этого явления может заключаться в увеличении теплового потока из недр земли.

Как известно, в сентябре 2003 г. в районе исследований произошло землетрясение магнитудой 7,3 балла, в результате которого был почти полностью разрушен пос. Бельгир. Землетрясение сопровождалось образованием многочисленных трещин и вторичных дислокаций – оползней, горных обвалов, осыпей, камнепадов, сейсмогравитацион-

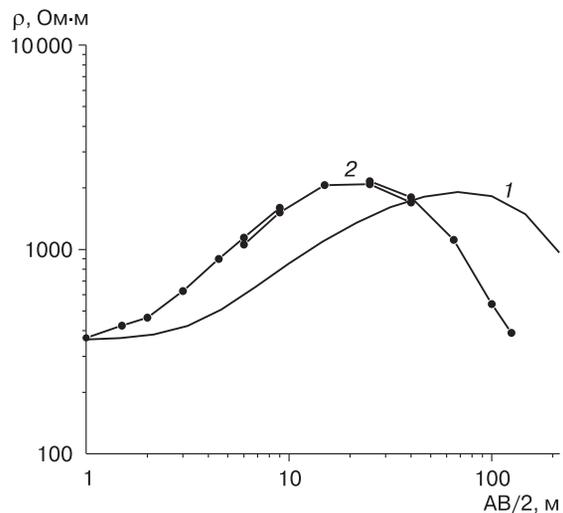


Рис. 5. Синтетическая (1) и полевая (2) кривые ВЭЗ.

ных оседаний склонов, выбросов разжиженного песчано-глинистого материала в виде грифонов и грязевых вулканчиков и компенсационных проседаний земной поверхности [Рогожин и др., 2004]. Все это привело к изменению гидрогеологического режима и возникновению интенсивной восходящей фильтрации по тектоническим нарушениям, что, в свою очередь, могло сопровождаться образованием гидрогеогенных таликов и увеличением их площади [Мерзлотоведение, 1981]. Специальными исследованиями [Кац, Робертус, 2004] в эпицентральной части землетрясения было установлено повышение температуры подземных вод на 1–2 °С и увеличение в 1,2–1,3 раза дебита родников и скважин, каптирующих водоносные зоны в осадочно-вулканогенных породах Ануйско-Чуйского прогиба.

Наряду с малоглубинными электроразведочными съемками в 2009 г. в данном районе с целью изучения его глубинного строения были выполнены магнитотеллурические зондирования (МТЗ), результаты которых косвенно подтверждают гипотезу о гидрогеогенном генезисе таликов. На рис. 6 приведено распределение удельного электрического сопротивления земной коры до глубины 12 км, из которого видно, что в окрестностях пос. Новый Бельтир (МТЗ 20, 21) линейной крутопадающей зоной низкого сопротивления (от 1 до 10 Ом·м) трансируется глубинный разлом.

Напомним, что на этом же участке профиля, по данным ЗСБ и ВЭЗ, отмечается уменьшение мощности ТМП (см. рис. 4). Примечательно, что пос. Новый Бельтир, построенный на месте разрушенного землетрясением 2003 г. селения, располагается в зоне глубинного и, скорее всего, активного разлома.

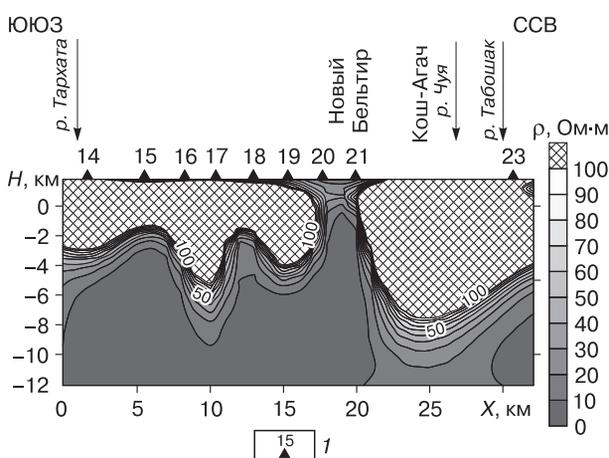


Рис. 6. Распределение удельного электрического сопротивления пород Чуйской впадины по глубине (по данным МТЗ).

1 – точка магнитотеллурического зондирования и ее номер.

ВЫВОДЫ

1. Электроразведочные исследования верхней части разреза Чуйской впадины выявили признаки нарушения обычной высотной зональности ММП.

2. Установлены закономерности распространения ТМП, характерные для межгорных впадин, а именно: а) на склоне северо-северо-восточной экспозиции мощность ТМП выше, чем на склоне юго-юго-восточной экспозиции, б) мощность горизонта с высоким удельным сопротивлением, отождествляемого с ТМП, уменьшается при удалении от центра впадины, по контуру горного обрамления предполагается наличие полосы ТМП малой мощности или ее отсутствие.

3. Сопоставление данных 1977 и 2009 гг. о строении криолитозоны по буровому профилю, пересекающему Чуйскую впадину, показывает, что в зоне разлома, который приближается к поверхности в районе пос. Новый Бельтир, глубина залегания подошвы ТМП уменьшилась с 73 до 30 м.

4. Сокращение мощности ТМП отмечается и на северном борту долины.

5. Предполагается, что деградация мерзлых пород вызвана напорной восходящей фильтрацией подземных вод по тектоническим нарушениям, активизированным в результате землетрясения 2003 г.

Литература

Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. “ТЕМ-IP” – система для интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред // 1-я Междунар. науч.-практ. конференция по электромагнитным методам исследования “ГЕОБАЙКАЛ-2010” (15–20 авг. 2010 г.). Иркутск. (Публ. на CD: ISBN 978-5-88942-096-5).

Геокриология СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. Т. V. Горные страны юга СССР. М., Недра, 1989, 359 с.

Кац В.Е., Робертус Ю.В. Гидрогеологические особенности в эпицентральной части Чуйского землетрясения // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. Горно-Алтайск, РИО ГАГУ, 2004, с. 99–101.

Конищев В.Н., Лебедева-Верба М.П., Рогов В.В., Сталина Е.Е. Криогенез современных и позднелайстоценовых отложений Алтая и перигляциальных областей Европы. М., ГЕОС, 2005, 133 с.

Матвеев Б.К. Электроразведка. Учебник для вузов. М., Недра, 1990, 368 с.

Мерзлотно-гидрогеологическая карта м-ба 1:200 000. Новосибирск, Отдел фондов Зап.-Сиб. геол. управления; Инв. № 18195, 1977.

Мерзлотоведение (краткий курс) / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, 240 с.

Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю. Электромагнитные методы для исследования строения и геодинамики Чуйской впадины Горного Алтая // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия. Горно-Алтайск, РИО ГАГУ, 2004, с. 37–47.

Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю., Манштейн А.К., Плотников А.Е. Геоэлектрическое строение и электромагнитный мониторинг западной части Чуйской впадины Горного Алтая // Материалы 2-го Междунар. симпозиума "Активный геофизический мониторинг литосферы Земли". Новосибирск, 2005а, с. 212–257.

Неведрова Н.Н., Манштейн А.К., Плотников А.Е., Плужников К.В. Геоэлектрические исследования в эпицентральной зоне Алтайского (Чуйского) землетрясения // Материалы 32-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского "Вопросы теории и практики геологической интерпретации магнитных и электрических полей". Пермь, Горн. ин-т УрО РАН, 2005б, с. 200–203.

Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В. Комплексная интерпретация данных электромагнитных зондирований с естественным и контролируемым источником в сейсмоактивных районах (на примере Горного Алтая) // Геофиз. журн., 2009, т. 31, № 4, с. 142–157.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Геодаков А.Р. О сильном землетрясении на Алтае. 2004. ([URL:// http: www.rfbr.ru/pics/17687ref/file.pdf](http://www.rfbr.ru/pics/17687ref/file.pdf)).

Шац М.М. Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны. Новосибирск, Наука, 1978, 237 с.

*Поступила в редакцию
29 июня 2010 г.*