

Изучение структуры скоростного разреза с разрывным нарушением, образовавшимся в результате Чуйского землетрясения 2003 года

П. А. Дергач^{1,2}, С. В. Яскевич^{1,2}, А. В. Яблоков^{1,2}*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты сейсморазведочных работ в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения, проведенных летом 2021 года. Объектом исследований являлась трещиноватая зона, на поверхности проявляющаяся в виде разрыва земной поверхности шириной 3-5, глубиной до 1 и протяженностью порядка 200 метров. Основная задача исследований 2021 года заключалась в изучении изменения структуры скоростного разреза в зоне разрыва, предположительно связанного с деградацией ММП. В результате обработки записей преломленных волн получена сейсмотомографическая модель по продольным волнам, а также выделена сейсмическая граница методом GRM. В результате обработки записей поверхностных волн методом MASW были получены одномерные разрезы поперечных волн для левой и правой частей разреза. Интерпретация результатов показала наличие талика мощностью около 30 метров, что свидетельствует об активном процессе деградации толщи ММП в исследуемой зоне.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, метод преломленных волн, сейсмическая томография, многоканальный анализ поверхностных волн, многолетнемерзлые породы

Altai earthquake (2003) fault zone velocity structure - case study.

P. A. Dergach^{1,2}, S. V. Yaskevich^{1,2}, A. V. Yablokov^{1,2}*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper presents the results of seismic surveys in the epicentral zone of the Alaty earthquake (2003), conducted in the summer of 2021. The object of research was a fractured zone, which on the surface manifests itself as a rupture of the earth's surface with a width of 3-5, a depth of up to 1 and a length of about 200 meters. The main objective of the 2021 research was to study changes in the structure of the velocity section in the rupture zone, presumably associated with the degradation of the permafrost. As a result of processing records of refracted waves, a seismotomographic model for P-waves was obtained, and a seismic boundary was identified by the GRM method. As a result of processing surface wave recordings by MASW, one-dimensional S-wave sections were obtained for the left and right parts of the section. Interpretation of the results showed the presence of a huge unfrozen zone with a thickness of about 30 meters, which indicates an active process of degradation of the permafrost in this area.

Keywords: near surface seismic, seismic refraction, seismic tomography, multichannel analysis of surface waves, permafrost

Введение

27 сентября 2003 г. на территории Горного Алтая произошло крупное землетрясение с магнитудой 7.3 (по данным Геофизической службы СО РАН). В эпицентральной зоне образовались множественные разрывы Земной поверхности, крупнейший из которых в настоящий момент представляет собой протяженный ров субмеридиального простирания протяженностью около 200, шириной 3-5 и глубиной 1 метр. С 2004 по 2010 год на этой площади проводились комплексные геофизические исследования, в том числе профильные сейсморазведочные работы [1]. По результатам исследований был построен сейсмoeлектрический разрез, на котором, в частности, отчетливо виден слой многолетнемерзлых пород (ММП), залегающий на глубине около 5 метров. Кроме того, в непосредственной близости от системы разрывов была выделена трещиноватая зона, которая консолидировалась в течение нескольких лет после землетрясения.

В августе 2021 года в рамках студенческого полевого лагеря SEG сотрудниками ИНГГ СО РАН и НГУ были проведены сейсморазведочные исследования в зоне крупного разрыва Земной поверхности, расположенного в долине реки Чаган-Узун (рис. 1).



Рис. 1. Трещина разрыва в районе дислокации Чуйского землетрясения 2003 г. Красная линия – часть сейсмического профиля. Фото 2021 г.

Наблюдения производились вдоль линейного профиля, расположенного вкрест простиранию разрыва. Местоположение профиля частично совпадало с местоположением основного сейсморазведочного профиля, вдоль которого производились наблюдения в 2004-2009 гг. Основные отличия – меньшее расстояние между пунктами приема, и меньшая апертура сейсмической расстановки.

Основная задача сейсморазведочных исследований 2021 года заключалась в изучении изменения скоростной структуры разреза в районе крупного разрывного нарушения Земной поверхности, предположительно связанного с деградацией ММП.

Методы

Получение данных

Полевые сейсморазведочные наблюдения производились вдоль линейного профиля протяженностью 355 метров, простирающегося с юго-запада на северо-восток. Параметры сейсмической расстановки: расстояние между соседними пунктами приема (ПП) – 5 метров, между пунктами возбуждения (ПВ) – 20 м метров. Для регистрации колебаний использовалась 72-канальная беспроводная сейсмостанция SCOUT укомплектованная 10-герцовыми вертикальными сейсмоприемниками GS-20DX. Колебания возбуждались при помощи импульсного источника [2] в скважинах глубиной 0.5 м, заполненных водой.

Примерно в центре профиля (ПП 185-190 м.) расположен видимый разлом земной поверхности, простирающийся вкрест расстановки.

Обработка данных

Определение времен вступления целевых волн, увязка годографов по взаимным временам, а также построение преломляющей границы методом GRM [3] производилось с использованием программного пакета RadExPro. Для получения распределения скоростей продольных Р-волн в среде использовался алгоритм сейсмической томографии, реализованный в ИНГГ СО РАН [4]. Одномерное распределение скоростей поперечных S-волн было получено с использованием метода многоканального анализа поверхностных волн MASW [5].

На рис. 2 и 3 продемонстрированы примеры сейсмограмм (ПВ 20 и ПВ 355), полученных в ходе полевых наблюдений. Красным цветом выделена область сейсмограммы, где по результатам предыдущих работ была выделена трещиноватая зона. Тёмно-красным цветом выделено местоположение разрыва Земной поверхности на линии наблюдения.

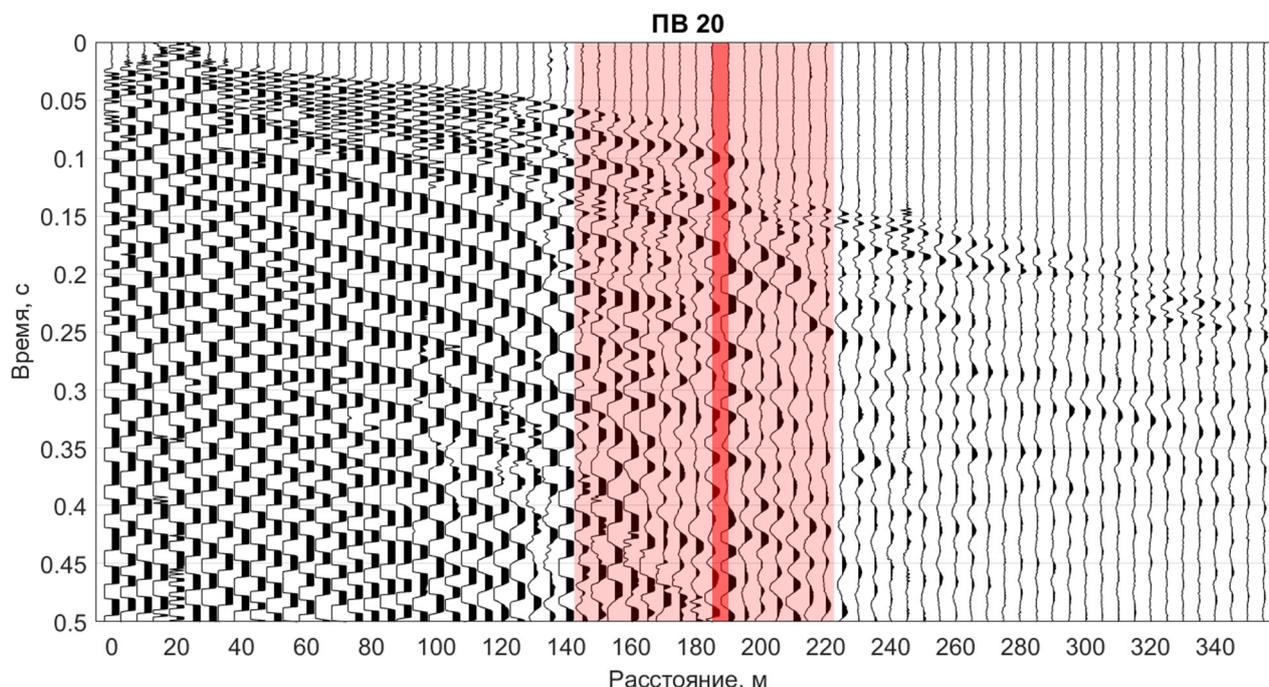


Рис. 2. Сейсмограмма общего пункта взрыва с ПВ 020 м

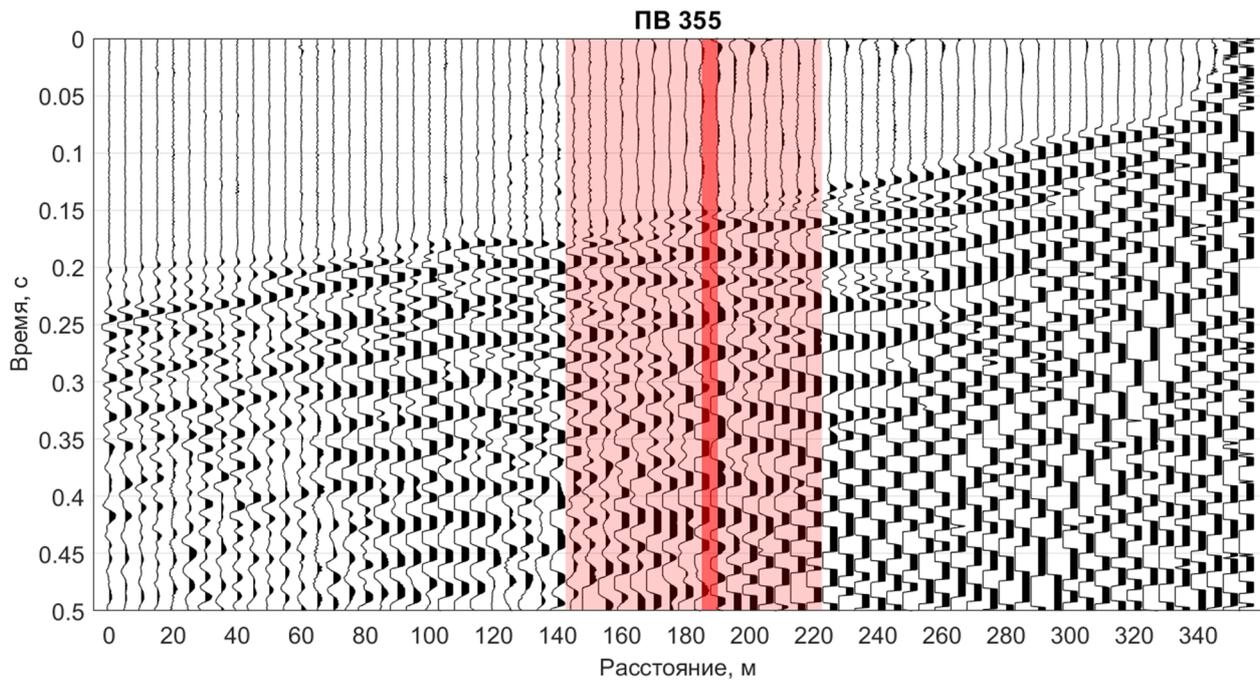


Рис. 3. Сейсмограмма общего пункта взрыва с ПВ 355 м

На сейсмограммах четко прослеживается затухание преломленной волны в области трещиноватости. На более поздних временах наблюдается сложная картина волнового поля, не характерная для горизонтально-слоистой среды, построенной по результатам работ в 2004-2009 гг. В то же время затухания волн явным образом не наблюдается.

Результаты

На рис. 4 приведены наблюдаемые годографы первых вступлений (черные линии) и годографы, полученные в результате томографической инверсии (красные линии).

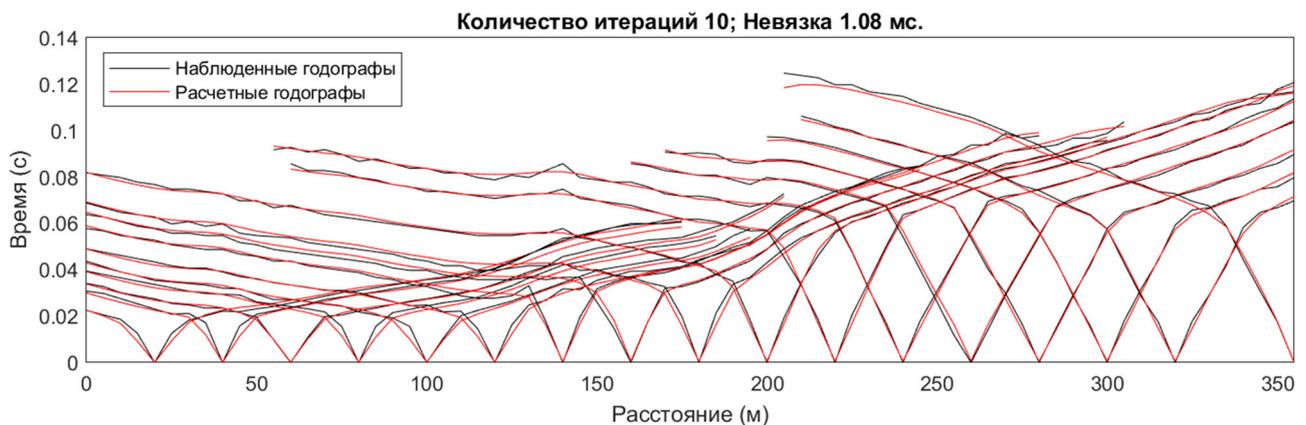


Рис. 4. Совокупность годографов первых вступлений, полученных в результате полевых наблюдений и томографической инверсии

Как видно из рисунка, наблюдаемые и расчетные годографы с высокой точностью совпадают, что свидетельствует о высокой степени достоверности результатов сейсмической томографии.

На рис. 5 приведена сейсмотомографическая модель распределения скорости Р-волн в среде. Дополнительно показана граница, полученная методом GRM (белая линия). Черные треугольники – ПП, красные – ПВ.

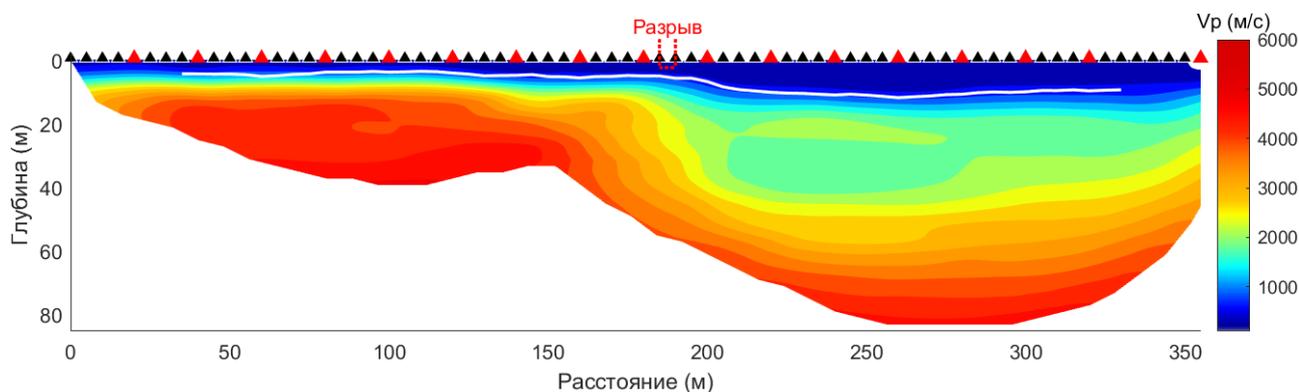


Рис. 5. Сейсмотомографическая модель и преломляющая граница, построенная методом GRM (белая линия)

Литологический и скоростной разрезы в данной области известны по данным предыдущих исследований [6].

Приповерхностный слой со скоростями продольных волн (V_p) порядка 400-500 м/с представлен гравием с рыхлым суглинистым заполнителем. Следующий слой, залегающий на глубине порядка 5 метров авторы интерпретируют как обводненный галечник в мерзлом (левая половина разреза) и талом (правая половина разреза) состояниях с характерными скоростями V_p порядка 4200 и 2000 м/с соответственно [7]. Ниже талика залегают ММП (галечник, либо песчаник).

Чтобы подтвердить наше предположение о талом состоянии пород в правой части профиля, было произведено построение одномерных разрезов скоростей поперечных волн (V_s) методом MASW для левой и правой частей разреза соответственно (рис. 6). Для построения разрезов использовались сейсмограммы с крайних ПВ расстановки (ПВ 020 и ПВ 355).

Как видно из рисунков, в левой части профиля четко выделяется два слоя со скоростями V_s 320 м/с и 2400 м/с. Граница между слоями залегает на глубине около 3 метров. Такие скорости V_s , опять же характерны для рыхлых отложений, состоящих из гравия с суглинистым заполнителем, а также водонасыщенных галечников в мерзлом состоянии. В правой части отчетливо выделяется 2 слоя: низкоскоростной (150-220 м/с) мощностью около 30 метров и высокоскоростной (2900 м/с). Такие скорости V_s характерны для водонасыщенных галечников и мерзлых галечников, либо песчаников (по данным предыдущих исследований, они залегают примерно на этой глубине). Кроме того, можно выделить промежуточный слой (880 м/с) мощностью порядка 8 метров, который возможно явля-

ется переходным слоем между талыми и мерзлыми породами. Полученные скорости V_P и V_S с мощностями соответствующих слоёв приведены в табл. 1.

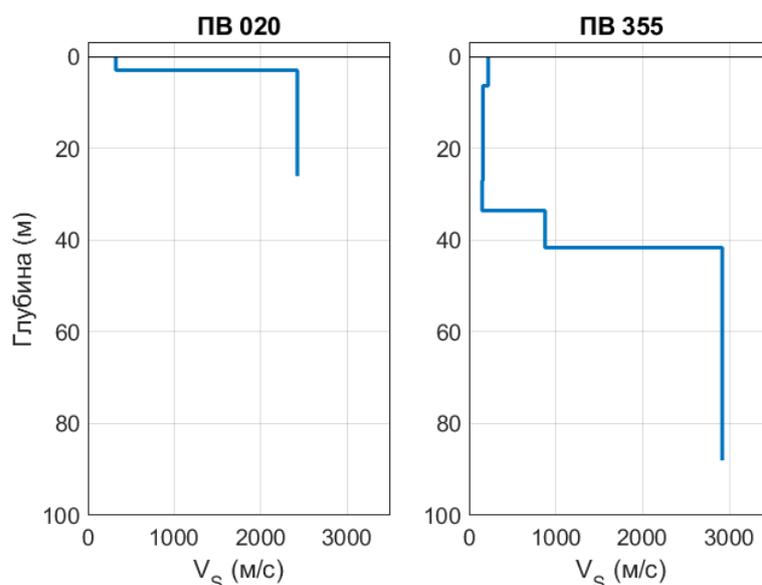


Рис. 6. Одномерные разрезы скоростей V_S полученные методом MASW для левой и правой половины разреза, соответственно.

Таблица 1

Характеристики слоистой скоростной модели по данным МПВ и MASW

Юго-Запад (ПП 0-180)				Северо-Восток (ПП 185-355)			
Номер слоя	Мощность, м	V_P , м/с	V_S , м/с	Номер слоя	Мощность, м	V_P , м/с	V_S , м/с
1	5	400	320	1	10	400	180
2	-	4200	2400	2	30	2000	
				3	-	4200	2900

Известно, что V_S для неводонасыщенных и водонасыщенных пород одинаковая, так как поперечная волна распространяется по минеральному скелету горной породы. Таким образом мы установили, что первая граница, выделенная в правой части разреза по продольным волнам, является границей раздела между неводонасыщенными и водонасыщенными (талыми) галечниками. Это подтверждает наше предположение о талике мощностью около 30 метров в части профиля, расположенной правее разрыва на поверхности.

Обсуждение

По мнению авторов, подтвердить вывод о том, что затухание сигнала преломленной волны в первых вступлениях связано с геометрией границы в районе трещины разрыва, поможет численное моделирование. В частности, на это будут направлены дальнейшие исследования.

Заключение

Совместная интерпретация результатов сейсмической томографии, а также методов GRM и MASW позволила установить, что в юго-западной части профиля, разрез (левая часть) представлен тонким приповерхностным слоем гравия с суглинистым заполнителем, залегающим над толщей водонасыщенных галечников в мерзлом состоянии. В северо-восточной части профиля отчетливо выделяется талик мощностью около 30 метров, залегающий на слое мерзлых галечников либо песчаников. Данный результат значительно отличается от результатов сейсморазведочных исследований 2004-2009 гг. прежде всего, наличием талика, расположенного северо-восточнее разрыва Земной поверхности. Это свидетельствует об активном процессе деградации толщи ММП в исследуемой зоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов В. А. и др. Технология и результаты исследований сейсмического шума в зоне главного разрыва разрушительного Чуйского землетрясения 2003 года // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2008. – №. 2. – С. 26-32.
2. Санфиоров И. А. и др. Импульсный пороховой источник упругих колебаний. – Патент РФ № 2439620 на изобретение 2012.
3. Palmer D. The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation // Society of Exploration Geophysicists. – 1980.
4. Чернышев Г. С., Яблоков А. В. nSeisLab. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617513. – 2019.
5. Yablokov A. V. et al. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // Geophysical Prospecting. – 2021. – Т. 69. – №. 7. – С. 1405-1432.
6. Куликов В. А. и др. Результаты исследования трещиноватой зоны Чуйского землетрясения и их приложение к решению задач нефтегазовой геологии Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2011. – №. 3. – С. 23-30.
7. Горяинов Н. Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии // Недра. – 1992. – 264 с.

© П. А. Дергач, С. В. Яскевич, А. В. Яблоков, 2022