



ТЕХНОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОРОДЫ НА УЧАСТКЕ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА: ХАРАКТЕРИСТИКА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

А.В. Беляшов¹, В.Д. Суворов², Е.А. Мельник²

¹Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан
071100, Восточно-Казахстанская область, Курчатов, площадка Меридиан, Казахстан; e-mail: abelyashov@igr.kz

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3/1, Россия; e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Рассматривается строение верхней части разреза на участке расположения взрывных скважин. Используются данные первых вступлений на восемь параллельных профилях длиной по 6 км и с шагом между ними 500 м. По временам первых вступлений методом лучевого трассирования определена скоростная структура разреза до глубины 200–250 м. В области расположения взрывных скважин выделен техногенно-измененный слой мощностью 40–80 м и скоростью, уменьшенной относительно ненарушенных пород на величину до 1–2 км/с. Слой залегает под зоной малых скоростей на глубине 20–70 м, а его толщина изменяется пропорционально весу ядерного заряда.

Подземные ядерные взрывы, Семипалатинский испытательный полигон, техногенное изменение горных пород, рефрагированные волны, сейсмическое лучевое трассирование, скорость

TECHNOGENICALLY CHANGED NEAR-SURFACE ROCKS OF SEMIPALATINSK TEST SITE BASED ON SEISMIC DATA

A.V. Belyashov¹, V.D. Suvorov², E.A. Melnik²

¹Institute of Geophysical Research, Ministry of Energy,
071100, Kurchatov, Site Meridian, Republic of Kazakhstan; e-mail: abelyashov@igr.kz

²Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, acad. Koptyug prosp., 3/1, Russia; e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

We consider the near surface seismic structure on the location site of the borehole nuclear explosions. Observations of refracted waves on eight parallel profiles with a length of 6 km and a distance between them of 500 m were used. Velocity structure to a depth of 200–250 m is defined by forward ray tracing. Technologically modified layer of rocks is detected in the area of the explosive holes. Layer has a thickness of 40–80 m and the velocity therein is reduced by 1–2 km/sec as compared to the intact rocks. Layer located under the low velocity zone at a depth of 20–70 m, and its thickness varies in proportion to the weight of the nuclear charge.

Underground nuclear explosions, Semipalatinsk Test Site, technologically modified rocks, refracted waves, forward ray tracing, seismic velocity

ВВЕДЕНИЕ

Подземные ядерные взрывы (ПЯВ), проведенные в большом количестве на территории Семипалатинского испытательного полигона, существенно разрушили вмещающую геологическую среду с формированием определенных областей дезинтеграции горных пород [Адушкин, Спивак, 2004, 1993а; Михайлов, 1997]. В настоящей статье рассматриваются области техногенного воздействия подземных ядерных взрывов на верхнюю часть разреза площадки “Балапан” Семипалатинского испытательного полигона – зоны повышенной трещиноватости и откольных разрушений (рис. 1). Активный гидрорежим грунтово-трещинных вод, наблюдаемый на изучаемом участке [Коновалов и др., 2002; Горбунова, Иванов, 2008; Субботин и др., 2011], повышает вероятность переноса радионуклидных остатков по системе естественных и образованных взрывами трещин из приочаговых структур

в окружающую среду с выходом на дневную поверхность [Адушкин, Спивак, 1993б; Такибаев, 2003; Мукушева и др., 2006]. Это подтверждается и радиологическими обследованиями территории полигона, выявившими следы радиационного загрязнения в местах проведения подземных ядерных взрывов не только на уровне грунтово-трещинных вод, но и на дневной поверхности (в частности, в водах р. Чаган, протекающей в юго-восточной части площадки “Балапан”) [Поляков, Кругликов, 2008]. Соответственно, информация о параметрах (местоположении, размерах и конфигурации) указанных структур необходима для контроля и прогнозирования процессов миграции грунтово-трещинных вод. В 1997 г. на территории Семипалатинского полигона проведены сейсмические наблюдения методом первых вступлений с целью изучения скоростных характеристик геологической среды, под-

вергшейся многократному воздействию скважинных ПЯВ, и выявления в верхней части разреза региональных поствзрывных проницаемых структур.

Методический аспект выполняемых исследований, связанный с обоснованным выбором способа обработки сейсмических данных и определением параметров изучаемого разреза (детальности и глубины), описан в [Беляшов и др., 2013]. В настоящей статье приводятся результаты обработки сейсмических данных в виде двумерных скоростных моделей и площадных карт изменения мощности и скорости в выделенном откольном слое.

ДВУМЕРНЫЕ СКОРОСТНЫЕ МОДЕЛИ

Сейсмические наблюдения выполнялись на участке “Балапан” по площадной системе размером 6000×3500 м, состоящей из восьми параллельных профилей. Расстояние между профилями 500 м, шаг между пунктами взрыва (ПВ) 500 м, интервал наблюдения 125 м. Для возбуждения упругих колебаний использовались химические взрывы массой заряда до 40 кг.

Методические аспекты сейсмического моделирования подробно рассмотрены в работе [Беляшов и др., 2013]. Здесь отметим только основные особенности применения метода лучевого трассирования. Подбор скоростных моделей вдоль профилей (рис. 2) выполнен по программе SeisWide [Zelt, Smith, 1992], адаптированной в среду Windows (Dr. Deping Chian). Глубинность разрезов ограничена 300 м, что определяется наибольшей глубиной проникания лучей продольных волн по годографам длиной до 6 км из крайних ПВ.

Слоистость построенных разрезов определяется резкими изменениями кажущейся скорости, коррелируемыми вдоль профилей, а градиент – областями прослеживания отрезков годографов в окрестности первых вступлений. В результате получены слоисто-градиентные модели с латеральными изменениями скорости в выделенных слоях, которые наблюдаются в зонах, подчеркивающих блоковую структуру. Зона малых скоростей (ЗМС) с фиксированной скоростью 1.4 км/с (шаг между сейсмоприемниками в 250 м не позволяет получить сведения о скорости в ЗМС) прослеживается на всех профилях, и ее толщина изменяется от 5 до 125 м. В начальной части профилей пониженная до 3.0 км/с скорость соответствует рыхлым юрским отложениям, ограниченным сбросовым разломом от каменноугольных отложений палеозойского фундамента.

Количество и мощность выделенных сейсмических слоев на разрезах изменяются в зависимости от расположения боевых скважин (см. рис. 2). Так, на профилях 1 и 3 с плотным расположением боевых скважин под подошвой ЗМС наблюдается слой мощностью 50–80 м со скоростью 3.5–3.8 км/с по всей их длине. При этом подстилающий слой характеризуется скоростью 4.3–4.6 км/с и разрез описывается трехслойной покрывающей средой. На профиле 4 указанный слой наблюдается в центральной части профиля, также в области размещения боевых скважин. На остальных профилях слой со скоростью 3.4–3.8 км/с под подошвой ЗМС имеет ограниченное проявление с горизонтальными размерами от 500 м до 2 км также в окрестностях боевых скважин, и в целом структура скоростного разреза представлена двуслойной покрывающей моделью. Кровля подстилающего полупространства для большинства профилей залегает на глуби-

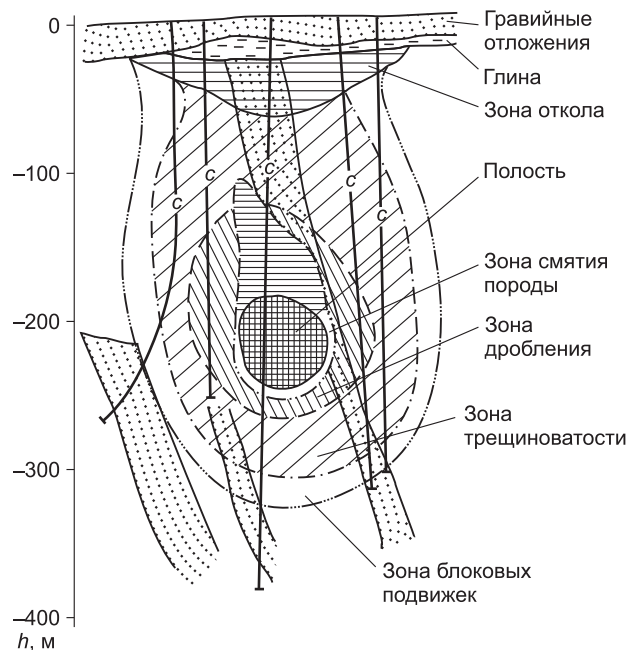


Рис. 1. Центральная зона подземного ядерного взрыва (С – исследовательские скважины, пробуренные через область ПЯВ) [Адушкин, Спивак, 1993а].

не 120–170 м и характеризуется скоростью 4.8–5.3 км/с. Таким образом, прерывистый слой с промежуточной между ЗМС (1.4 км/с) и подстилающим слоем (4.3–4.8 км/с) скоростью 3.4–3.8 км/с наблюдается в областях расположения взрывных скважин.

ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ

Для обоснованного отнесения выделенного по сейсмическим данным прерывистого слоя пониженной скорости к техногенному образованию необходимо оценить возможные изменения скорости вследствие подземных взрывов, чтобы отделить их от природных неоднородностей. Такая задача решалась путем сопоставления изменений сейсмической скорости с глубиной (см. рис. 2) в окрестности 12 боевых скважин и лабораторных измерений на образцах керна из тех же скважин, отобранных при их бурении до проведения взрывов. Для трех из них, с наиболее распространенными типами вскрытых скважинами пород, и четвертой, где взрыва не было, результаты приведены на рис. 3. Для всех изученных скважин, представленных разными по составу горными породами, характерно понижение скорости продольных волн для подвергшихся взрывному воздействию горных пород относительно их исходного состояния в среднем на 1.5–2.1 км/с в пределах сейсмического слоя, залегающего на глубине 5–120 м под подошвой ЗМС (см. рис. 3). Уменьшение скорости на 0.4–0.7 км прослеживается и далее, в подстилающий третий слой (на глубину до 200 м), и соответствует зоне повышенной трещиноватости, распространяющейся от откольной области в направлении к центру взрыва (см. рис. 1). Для горных пород в окрестности скв. 1316, не затронутых взрывом, скорости продольных волн по сейсмическим и скважинным данным практически совпадают (см. рис. 3). Заметим, что детальность сейсмических данных не может претендовать на обнаружение изменений скорости, связанных с тонкой слоистостью, тем

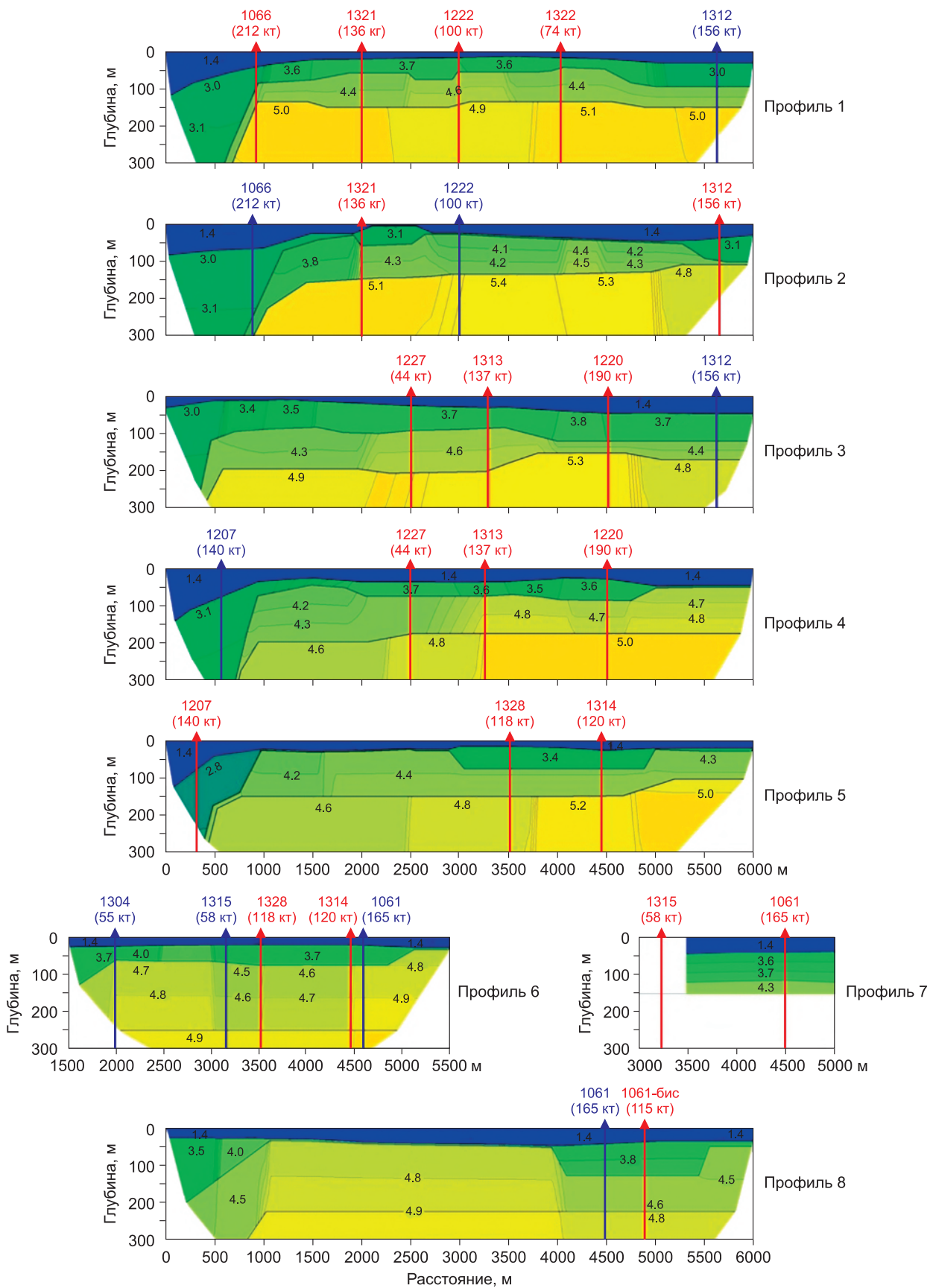


Рис. 2. Скоростные разрезы вдоль сейсмических профилей. Показаны проекции боевых скважин на профили с номерами и мощностью взрывов в кт (в скобках): красным цветом – для скважин, удаленных от профилей менее чем на 400 м, синим – на 400–700 м. Тонкие линии – изолинии скорости продольных волн, толстые – границы со скачком скорости в км/с.

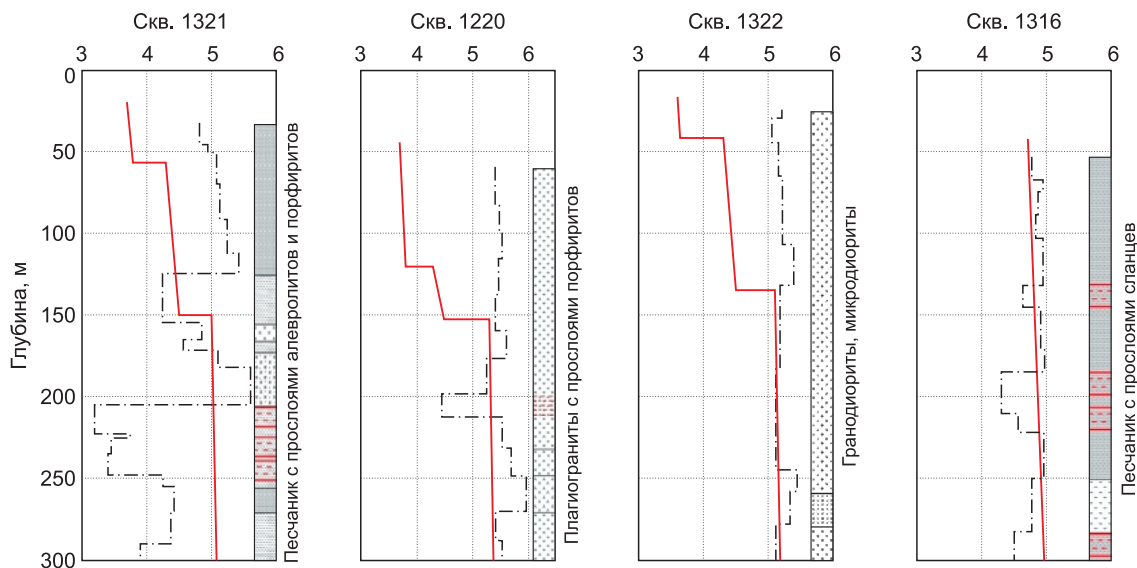


Рис. 3. Примеры сопоставления значений скорости продольных волн (км/с) по лабораторным измерениям на образцах из скважин до взрывов (черные штриховые линии) с результатами сейсмических наблюдений (красные линии). В колонках показаны типы пород вдоль ствола скважин.

более что разрез палеозойских пород очень неоднороден по латерали. Выявленные аномалии скорости характеризуют свойства среды при значительном осреднении.

Непротиворечивость сейсмических и скважинных данных подтверждает присутствие техногенно-измененных пород, наиболее контрастно проявляющихся в прерывистом сейсмическом слое со скоростью 3.4–3.8 км/с. Пространственное положение слоя коррелирует с участками расположения взрывных скважин, поэтому его можно принять за слой откольных пород (см. рис. 1), наиболее подверженных техногенному изменению среды вблизи дневной поверхности.

КАРТИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО СЛОЯ

По сети параллельных сейсмических профилей проведено картирование изменений мощности слоя, залегающего под зоной малых скоростей (рис. 4). Увеличение его толщины до 200 м в левой части карты определяется низкоскоростными рыхлыми породами юрского возраста, отделенными от остальной час-

ти площади региональным сбросом. Для остальной части площади в породах палеозойского фундамента мощность техногенного слоя достигает 30–90 м, коррелируя с расположением боевых скважин. При плотном расположении боевых скважин формируются непрерывные протяженные области с поперечными размерами до 4 км. На участках отсутствия взрывов такие зоны не проявлены. Площадное распространение техногенно-измененных пород контролируется областью с пониженной до 3.4–3.8 км/с скоростью (см. рис. 4, б). За пределами участков размещения боевых скважин скорости повышены до 4.2–4.6 км/с.

По экспериментальным данным известно, что толщина откольных зон пропорциональна мощности подземного взрыва. В этой связи представляется интересным рассмотреть эту корреляцию по полученным сейсмическим данным, что подтвердит обоснованность выделения откольного слоя. Имеющиеся на этот счет данные представлены на рис. 5, где высокая степень корреляции свойственна подавляющему количеству данных. Однако данные по шести скважинам резко отклоняются от такой корреляции. Породы

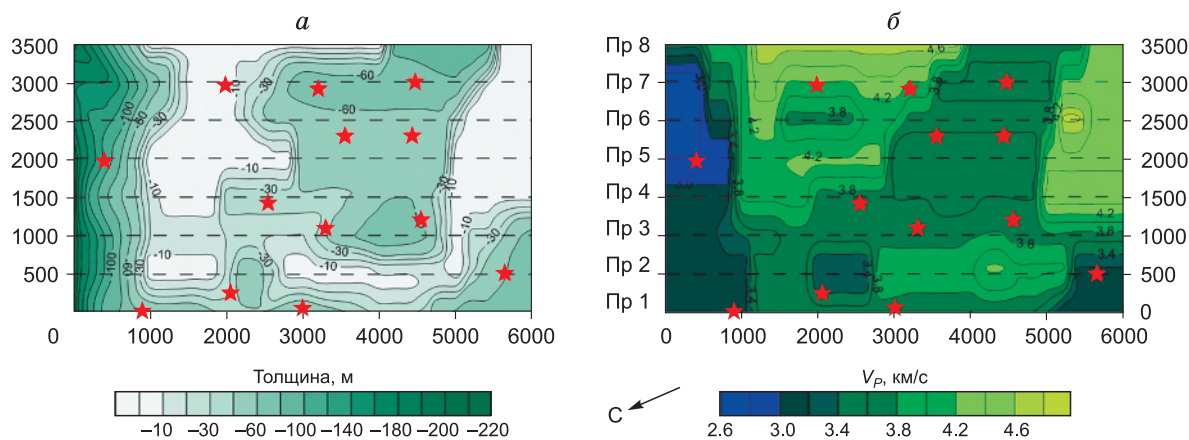


Рис. 4. Карты мощности откольного слоя (а) и распределения значений скорости на его кровле (б). Красные звезды – скважины ПЯВ. Штриховыми линиями показаны сейсмические профили.

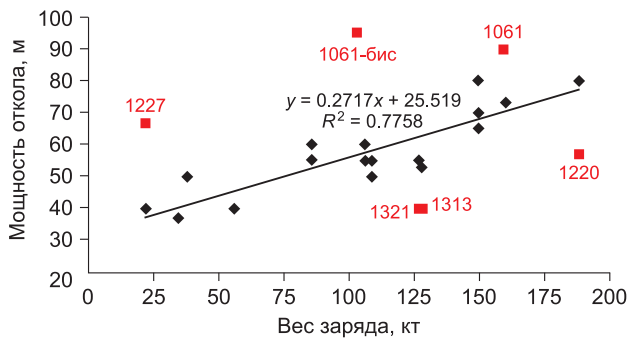


Рис. 5. Зависимость мощности откольной зоны от веса заряда.

Черные ромбы – нормальные значения, красные квадраты – аномальные (с номером скважины), черная линия – аппроксимирующий тренд.

фундамента, вскрытые скважинами с отклоняющимися значениями, характеризуются аномальными прочностными параметрами (модулем Юнга, прочностью на растяжение и сжатие), влияющими на толщину техногенно-измененных пород. Следовательно, полученный тренд можно считать достаточно обоснованным и использовать его при оценке сейсмической мощности откольных зон на других участках испытательного полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты сейсмического изучения строения верхней части разреза на участке “Балапан” Семипалатинского испытательного полигона позволили выделить и локализовать техногенную область воздействия подземных ядерных взрывов. Прежде всего речь идет о зонах откольных проявлений, сформированных в окрестности боевых скважин под подошвой ЗМС и характеризующихся мощностью от 30 до 90 м и скоростью 3.4–3.8 км/с, что в среднем на 1.5 км/с ниже скорости не нарушенных взрывом горных пород на этой же глубине. При плотном проведении ядерных испытаний откольные области от отдельных боевых скважин формируют непрерывные структуры (слои) протяженностью до 4 км. Установлена прямая корреляционная связь между мощностью откольного слоя и весом ядерного заряда.

Для нижележащих слоев до глубины 120–150 м скорость пород в современном состоянии понижена относительно ее исходных значений на 0.4–0.7 км/с, что позволяет отнести эти участки к зонам повышенной трещиноватости.

Выделенные по сейсмическим данным области пониженных значений скорости продольных волн в верхней части разреза могут быть отнесены к пронизываемым участкам геологической среды повышенной

техногенной трещиноватости. Изучение этих участков необходимо для решения геоэкологических задач на полигоне при прогнозировании процессов миграции грунтово-трещинных вод с возможным переносом радиоактивных загрязнений. Корреляционная связь между величиной заряда и мощностью слоя техногенно-измененных пород может использоваться для прогнозирования его распространения на других участках полигона.

Литература

- Адушкин В.В., Спивак А.А.** Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993а. 319 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.** Изменение уровня подземных вод в результате проведения подземных ядерных испытаний // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993б. № 9. С. 38–43.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.** Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах // Физика горения и взрыва. 2004. № 6. С. 15–26.
- Беляшов А.В., Суворов В.Д., Мельник Е.А.** Сейсмическое изучение верхней части разреза на участке Семипалатинского ядерного испытательного полигона // Технологии сейсморазведки. 2013. № 3. С. 64–75.
- Горбунова Э.М., Иванов А.И.** Изменение гидрогеологических параметров в техногенно-нарушенных условиях // Вестник НЯЦ РК. 2008. № 1. С. 27–32.
- Коновалов В.Е., Пестов Е.Ю., Распопов Н.Я.** Некоторые особенности подземных вод участка Балапан по данным текущего обследования глубоких скважин // Вестник НЯЦ РК. 2002. № 2. С. 96–99.
- Михайлов В.Н.** Ядерные испытания СССР : в 3 т. М.: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. Т. 2: Технологии ядерных испытаний СССР. Воздействие на окружающую среду. Меры по обеспечению безопасности. Ядерные полигоны и площадки.
- Мукушева М.К., Спиридонов С.И., Тлебаев М.Б. и др.** Моделирование миграции долгоживущего радионуклида ⁹⁰Sr подземными водами для территории, прилегающей к технической площадке “Балапан” // Вестник НЯЦ РК. 2006. № 2. С. 111–117.
- Поляков Л.Е., Кругликов Д.А.** Особенности оценки радиационного состояния подземных вод на территории Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2008. № 2. С. 106–109.
- Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Генова С.В.** Оценка возможностей протекания процессов катастрофического характера на площадке “Балапан” // Вестник НЯЦ РК. 2011. №2. С. 71–81.
- Такибаев Ж.С.** Рабочая модель миграции радионуклидов из мест подземных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2003. № 3. С. 37–43.
- Zelt C.A., Smith R.B.** Seismic traveltime inversion for 2D crustal velocity structure // Geophys. J. 1992. P. 16–34.

Поступила 23 января 2015 г.,
в окончательном варианте – 10 марта 2015 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

БЕЛЯШОВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделением Института геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Тел.: +7 722 512 31 46 (доб. 166); e-mail: abelyashov@igr.kz

СУВОРОВ Владимир Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. E-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

МЕЛЬНИК Елена Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.