

УДК 550.834.3:551.521.9:504

ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ (СЕМИПАЛАТИНСКИЙ ПОЛИГОН)

© 2020 г. А.В. Беляшов, В.Д. Суворов, Е.А. Мельник

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

Представлены сейсмические наблюдения, выполненные в 1997 г. на одном из участков Семипалатинского испытательного полигона методом рефрагированных волн с целью определения скоростной структуры верхней части разреза до глубины 300 м и картирования в ней проницаемых областей, по которым в окружающую среду могут переноситься радиоактивные вещества из ядерных взрывных камуфлетов. На исследуемом участке находятся 14 вертикальных скважин, в которых в 1972–1987 гг. осуществлялись подземные ядерные взрывы. Сейсмические наблюдения проводились по восьми параллельным профилям; длина каждого профиля составляла 6 км, расстояние между профилями – 500 м, шаг между пунктами взрыва – 500 м, между точками приема – 125 м. Для возбуждения упругих колебаний использовались заряды химических взрывчатых веществ весом до 40 кг. Скоростные разрезы строились методом лучевого трассирования с использованием программы *SeisWide*.

На глубинах до 150 м в эпицентральных областях подземных ядерных взрывов радиусом до 250 м были прослежены приповерхностные техногенные изменения среды, выраженные уменьшением скорости сейсмических волн – продольных до 1.0 км/с, поперечных до 0.5 км/с. Горизонтальные размеры выделенных областей изменяются от 500 м для одиночных взрывов до 4–5 км при плотном размещении взрывных скважин. В этих областях значение коэффициента Пуассона составляет в среднем 0.35 ± 0.02 , превышая его значения, определенные по керну из скважин до проведения в них ядерных взрывов (0.29 ± 0.03). Установлена устойчивая корреляция между рассчитанной техногенной плотностью трещин и значением коэффициента Пуассона после взрыва. Пространственные изменения наведенной трещиноватости определяются величиной зарядов без явной зависимости от геологического строения района.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон, подземные ядерные взрывы, сейсмический метод первых вступлений, скорость продольных и поперечных волн.

Введение

Изучение геоэкологической обстановки в местах проведения подземных ядерных взрывов, в частности, в пределах Семипалатинского испытательного полигона, актуально как для решения прикладных задач, главной среди которых является обеспечение радиационной безопасности населения рассматриваемого региона и расположенных на его территории объектов, так и для разработки методов изучения нарушенной ядерными взрывами геологической среды.

Проведение подземных ядерных взрывов в скважинах повлекло за собой разрушение геологической среды [Архипов и др., 2003; Садовский, 2004], приведшее к образованию в ней областей разуплотнения – от пустотных полостей в окрестности гипоцентров до зон необратимых деформаций и откольных проявлений с повышенной проницаемостью пород в приповерхностных участках [Адушкин, Стивак, 1993, 2004].

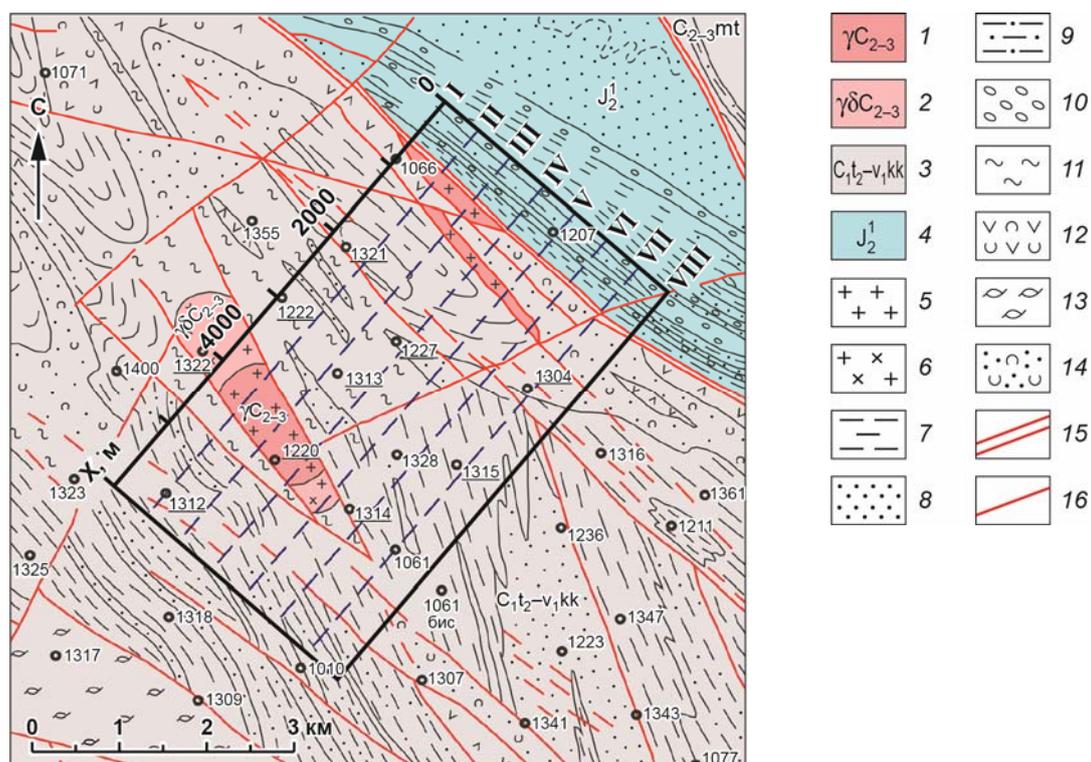
В зависимости от инженерно-геологических условий, в которых были произведены подземные ядерные взрывы [Ядерные..., 1997], возможно объединение зон естественной (экзогенной и тектонической) трещиноватости и зон техногенной дезинтеграции горных пород, которое приводит к формированию непрерывных проницаемых структур, простирающихся от очагов взрывов до дневной поверхности [Такибаев, 2003].

Существует предположение о переносе грунтовыми водами радиоактивных веществ из эпицентральных областей подземных ядерных взрывов в окружающую среду [Мукушева и др., 2006; Комлев и др., 2013]. Натурные радиоэкологические обследования таких участков обнаружили на дневной поверхности присутствие техногенных радионуклидов [Субботин и др., 2013], что подтверждает эту связь. Ситуация осложнена тектоническими разломами разных масштабов, повышающими миграцию грунтовых вод и радиоактивных веществ [Субботин и др., 2017].

Авторы данной статьи, продолжая начатое ранее сейсмическое изучение одного из участков Семипалатинского полигона [Суворов, Беляшов, 2012; Беляшов, Суворов, Мельник, 2013, 2015; Беляшов и др., 2017], сосредоточили свое внимание на анализе техногенных изменений среды и интерпретации их природы. При этом использовались данные из указанных работ и материалы, опубликованные в [Belyashov, Suvorov, Melnik, 2019].

Общая характеристика участка исследований

Представляемые в настоящей статье сейсмические наблюдения были выполнены в 1997 г. на участке, расположенном в пределах площадки Балапан Семипалатинского испытательного полигона (рис. 1). На территории исследуемого участка находятся 14 скважин (далее – взрывные скважины), в которых в 1972–1987 гг. проводились ядерные взрывы с использованием зарядов от 44 до 190 кт в тротиловом эквиваленте при глубине их заложения 466–550 м.



На исследуемом участке под зоной малых скоростей, состоящей из неогеновых глин и четвертичных аллювиальных отложений общей мощностью 10–70 м, залегает палеозойский фундамент. Он представлен нижнекаменноугольными осадочно-метаморфическими породами, а также средне- и позднекаменноугольными гранитными и гранодиоритовыми интрузиями [Ергалиев и др., 2000]. Деформационные характеристики названных пород различаются степенью и направленностью. На северо-востоке площадки залегают юрские осадочные породы, отделённые от каменноугольных региональным Чинрауским разломом. На участке распространены грунтовые воды напорного типа, связанные в основном с областями экзогенной трещиноватости коры выветривания палеозойского фундамента.

Исходные данные и их обработка

Сейсмические наблюдения были выполнены вдоль восьми профилей длиной 6 км каждый при расстоянии между ними 500 м; шаг регистрации по линии профиля – 125 м; взрывной интервал – 500 м. Для возбуждения упругих колебаний использовались взрывы химических веществ с весом заряда до 40 кг в скважинах глубиной до 10 м. Применялась трехкомпонентная регистрация сигналов, позволившая провести обработку как продольных (P), так и поперечных (S) волн. Запись сейсмических сигналов осуществлялась аппаратным комплексом КАРС (“Казгеофизприбор”) с 12-канальными аналоговыми станциями АСС-3/12 и трехкомпонентными сейсмоприемниками СК-1П.

Примеры записей вертикальных и горизонтальных компонент, полученных на профиле I из пункта взрыва ПВ 1500, приведенные на рис. 2, демонстрируют удовлетворительное качество регистрируемых P - и S -волн. Шаг между сейсмоприемниками в 125 м ограничивает возможности корреляции прямых волн вблизи пункта взрыва, что является серьезным недостатком. На рис. 3 фрагменты тех же сейсмограмм представлены в укрупненном масштабе, что позволяет более детально проанализировать особенности годографов P - и S -волн в ближней к пункту взрыва зоне.



Рис. 1. Фрагмент геолого-тектонической схемы площадки Балапан Семипалатинского полигона с указанием местоположения участка исследований. Граница участка – черный прямоугольник; римские цифры I–VIII – номера сейсмических профилей; X , м – расстояние от начала профилей; кружки – взрывные скважины с номерами (подчеркнуты номера скважин, в которых выполнены лабораторные измерения на образцах керна)

1, 2 – средне- и позднекаменноугольные интрузии: гранитные (1), гранодиоритовые (2); 3 – нижнекаменноугольные осадочно-метаморфические отложения; 4 – юрские породы (средний отдел, верхняя пачка); 5 – граниты; 6 – гранодиориты; 7 – глины; 8 – песчаники; 9 – алевриты; 10 – конгломераты; 11 – сланцы; 12 – туфы среднего состава; 13 – туфолавы; 14 – туфопесчаники; 15, 16 – разломы: региональные (15), локальные (16)

Fig. 1. Fragment of the geological-tectonic scheme of the Balapan area of Semipalatinsk test site with the contour of seismic exploration site (site borders – black rectangle; I–VIII – seismic profiles; X , m – distance from the profiles onset; circles – blastholes with their numbers; the numbers of blastholes for which laboratory measurements on core samples were performed are underlined)

1, 2 – middle- and upper carboniferous intrusions: granite (1), granodiorite (2); 3 – lower carboniferous sedimentary-metamorphic rocks; 4 – jurassic rocks (middle formation, upper assise); 5 – granites; 6 – granodiorites; 7 – clays; 8 – sandstones; 9 – siltstones; 10 – conglomerates; 11 – shales; 12 – tuffs of medium composition; 13 – welded tuffs; 14 – tuffaceous sandstones; 15–16 – faults: regional (15), local (16)

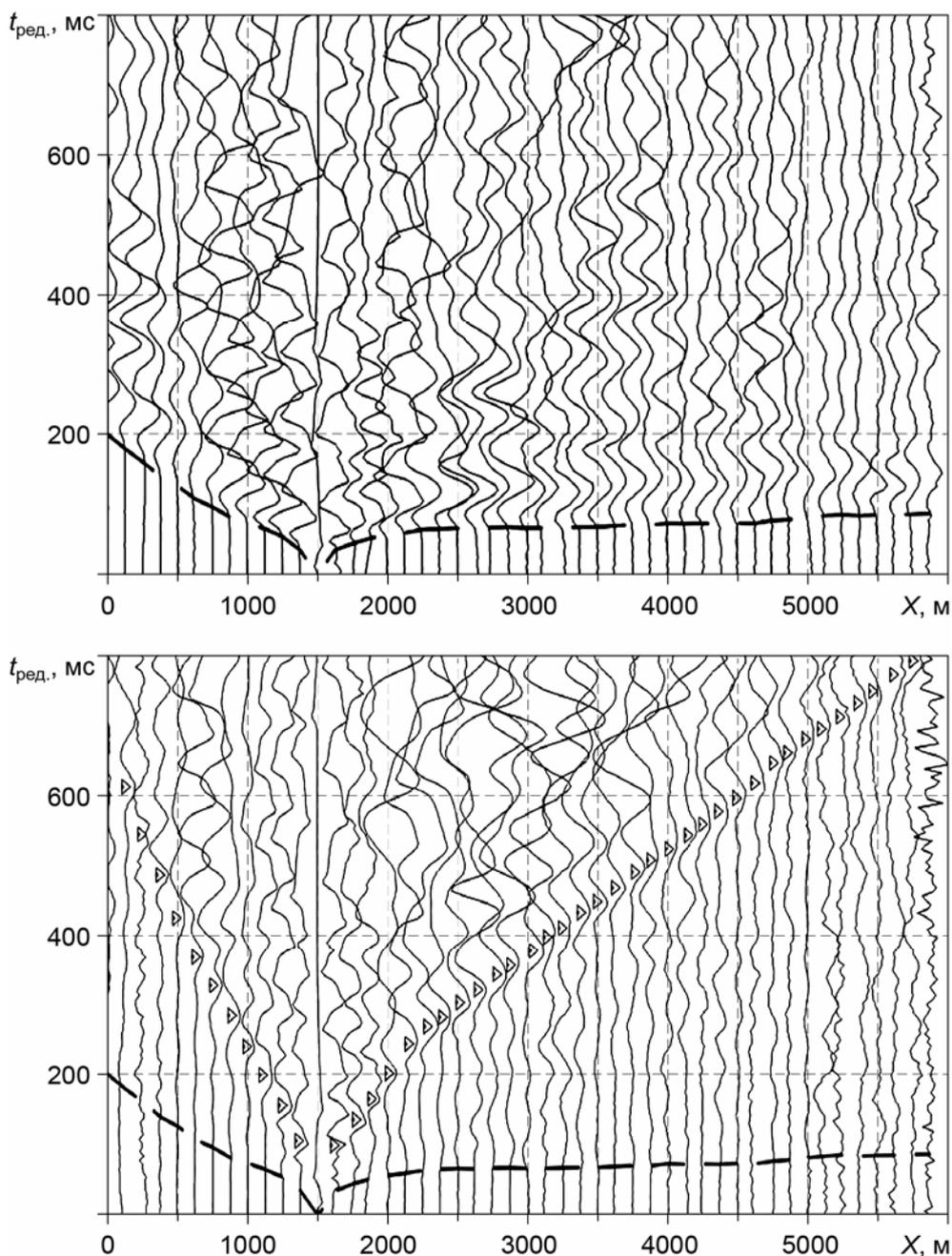


Рис. 2. Профиль I, ПВ 1500. Сейсмограммы волн P (вверху, вертикальная компонента) и S (внизу, горизонтальная компонента). Штриховые линии – годографы первых вступлений; треугольники – первая фаза S -волны

На вертикальных осях $t_{\text{ред.}} = T_{\text{набл.}} - D/V_{\text{ред.}}$, где $T_{\text{набл.}}$ – наблюдаемое время; D – расстояние “источник–приемник”; $V_{\text{ред.}}$ – скорость редуции, равная 5.1 км/с. На горизонтальных осях здесь и на рис. 3 – расстояние от начала профиля X , м

Fig. 2. Profile I, SP 1500. Seismograms of waves P (at the top, vertical component) and S (at the bottom, horizontal component). Dashed lines – first-arrival curves; triangles – the first phase of the S -wave

On the vertical axes $t_{\text{ред.}} = T_{\text{набл.}} - D/V_{\text{ред.}}$, where $T_{\text{набл.}}$ – the observed time; D – “source–receiver” distance; $V_{\text{ред.}}$ – reduction speed equal to 5.1 km/s. On the horizontal axes here and in Fig. 3 – distance from the beginning of the profile X , m

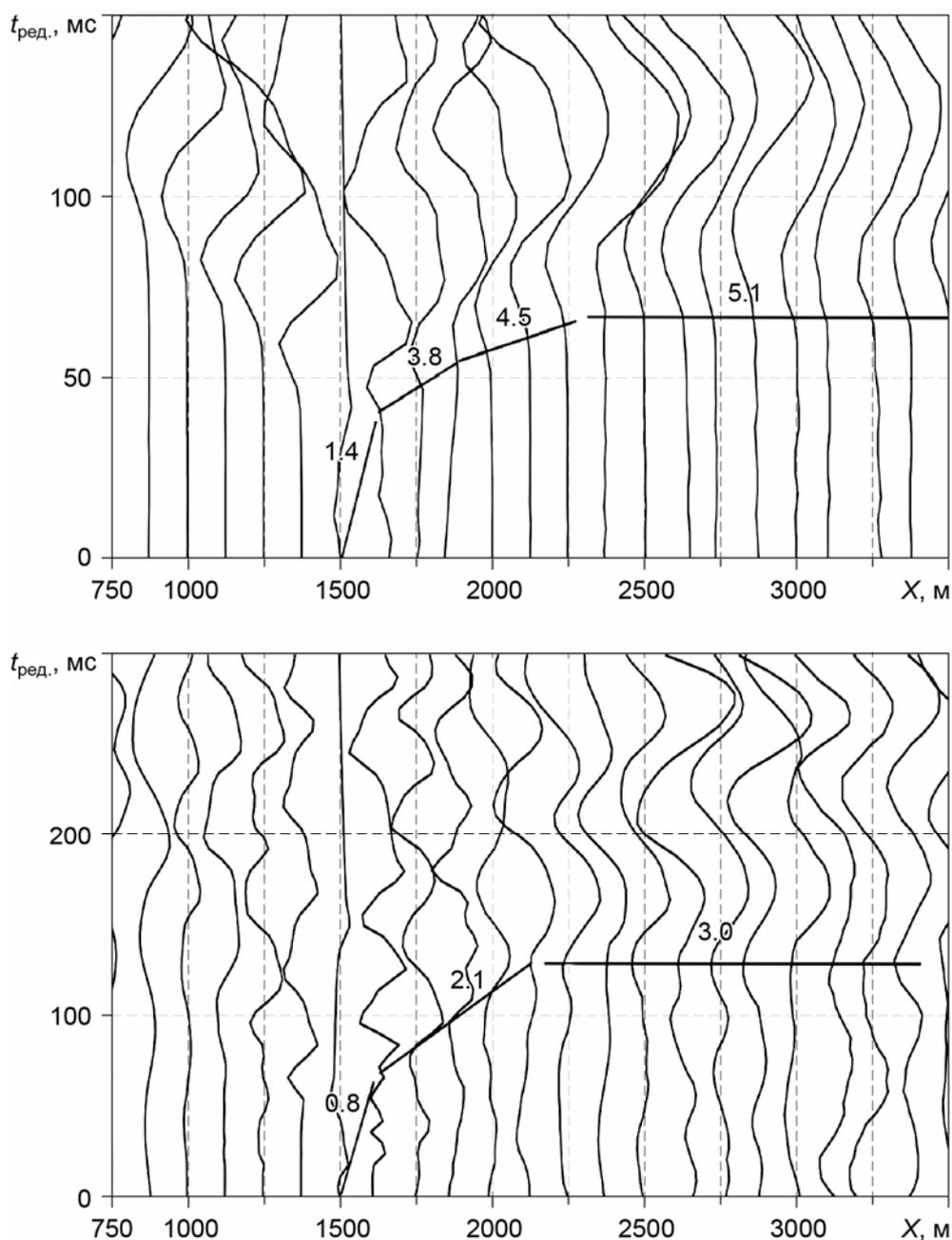


Рис. 3. Фрагменты приводимых на рис. 2 сейсмограмм в более крупном масштабе. Черными отрезками прямых отмечены интервалы прослеживания волн; цифры возле них – значения V^* , км/с. На вертикальных осях время в редуцированном масштабе – $V_{ред.}=5.1$ км/с (вверху) и 3.0 км/с (внизу)

Fig. 3. Fragments of seismograms given in Fig. 2 on a larger scale. Black segments of straight lines indicate intervals for tracking waves; the numbers next to them are values of V^* , km/s. On the vertical axes the time is in the reduced scale – $V_{ред.}=5.1$ km/s (at the top) and 3.0 km/s (at the bottom)

По первым вступлениям продольных волн могут быть выделены три участка с существенно различающимися значениями кажущейся скорости V^* (см. рис. 3, вверху). На первом из них, соответствующем зоне малых скоростей, значение V^* понижено до 1.4 км/с, на втором увеличивается до 3.8 км/с, на третьем – до 4.5 км/с. Далее на протяженном интервале профиля значение V^* практически не меняется, составляя

5.1 км/с и характеризуют подстилающее полупространство [Беляшов, Суворов, Мельник, 2015]. На записях горизонтальной компоненты (см. рис. 3, *внизу*) вблизи ПВ 1500 ($D=125-275$ м) по S -волнам признаки такой слоистости практически не прослеживаются. Второй и третий слои, выделяемые по P -волнам, в этом случае представляются одним интервалом с $V^*\approx 2.1$ км/с. Для зоны малых скоростей значение V^* составляет примерно 0.8 км/с.

Было выполнено сопоставление годографов S -волн, полученных вдоль проходящих вблизи взрывных скважин профилей I и II (рис. 4). Для большей наглядности эти годографы приведены в редуцированном масштабе времени ($V_{ред.}=3.0$ км/с) после введения поправки за зону малых скоростей. На годографах, полученных на профиле II из удаленных ПВ 4000, ПВ 4500, ПВ 5500, прослеживается область локального увеличения времени пробега, обозначенная овалом (годографы из других пунктов взрыва не показаны, поскольку они практически параллельны изображенным на рис. 4).

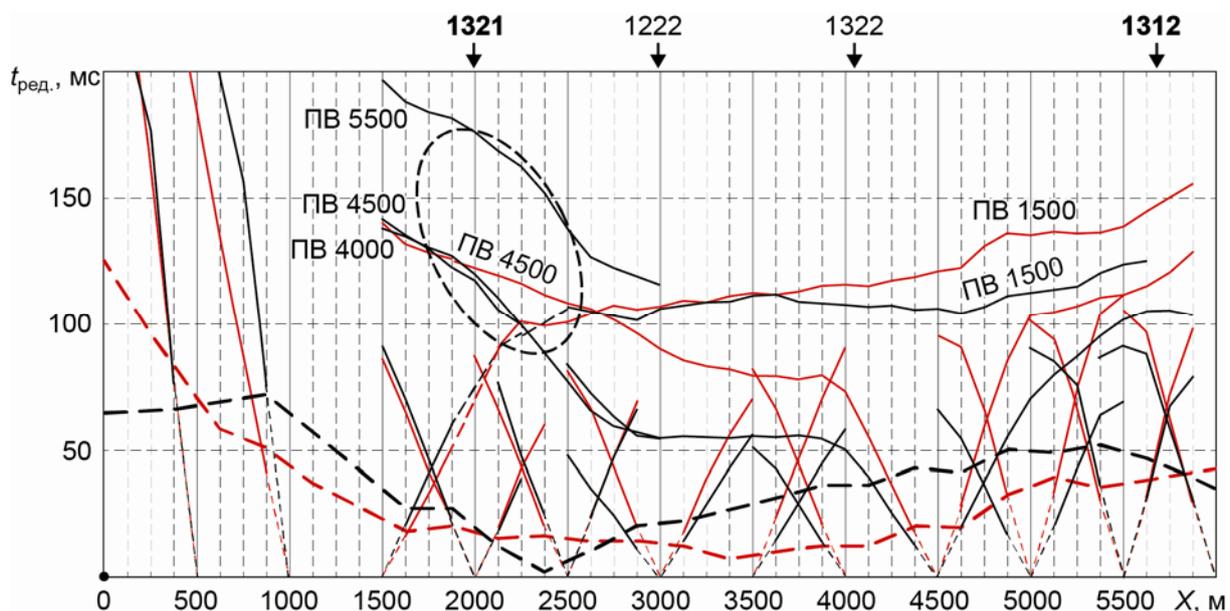


Рис. 4. Сопоставление годографов S -волн, построенных в редуцированном масштабе времени ($V_{ред.}=3.0$ км/с) для профилей I (красные линии) и II (черные линии). Над годографами стрелки с номерами – положение взрывных скважин (жирным шрифтом выделены номера скважин, ближайших к профилю II). Овал – граница области локального увеличения времени пробега вблизи скв. 1321. Красная штриховая кривая – поправки за зону малых скоростей для профиля I, черная – для профиля II

Fig. 4. Comparison of hodographs of S -waves constructed on a reduced time scale ($V_{ред.}=3.0$ км/с) for the profiles I (red lines) and II (black lines). Above the hodographs, the arrows with numbers indicate the position of the blastholes (in bold are the numbers of blastholes closest to the profile II). Oval is the boundary of the region of local increase in travel time near the blasthole 1321. The red dashed curve – corrections for the low-velocity zone for the profile I, black – for the profile II

При сопоставлении годографов отмечается увеличение времени пробега S -волны (снижение V^*) на участке профиля I, удаленном от его начала на 3000–5000 м. В пространстве эта локальная область изменения V^* коррелируется с положением близких к профилю скважин, расположенных на участке 2500–5000 м (см. рис. 1). Увеличение времени пробега S -волны на профиле I наблюдаются также и на годографе из ПВ 1500, чего нет на параллельном профиле II.

Локальное увеличение времен пробега S -волн наблюдается и на удаленных от пунктов взрывов участках годографов. Здесь регистрируются волны, проникающие под область, которая подверглась техногенному воздействию и является для сейсмических волн приповерхностной неоднородностью. Такая аномалия была отмечена в пределах участка 2000–2500 м профиля II на годографах из ПВ 4000, ПВ 4500 и ПВ 5500. Аналогичная картина наблюдается и на профиле I на встречных годографах из ПВ 1500 и ПВ 4500 (см. рис. 4).

Таким образом, локальное увеличение времен пробега волн в окрестностях взрывных скважин обнаруживается как в ближней, так и в дальней от источников возбуждения зонах. Распространяющиеся в ближней зоне преломленно-рефрагированные волны позволяют определить горизонтальные размеры, скорость и мощность области, подвергшейся техногенному воздействию. В дальней зоне аномалию можно проследить только по проходящим волнам в виде поверхностной неоднородности, оценив ее горизонтальные размеры и локальные изменения времен без непосредственного определения скорости и мощности.

Для моделирования сейсмического разреза использовался метод лучевого трассирования при направленном подборе параметров слоев – скорости в слоях (вместе с градиентами), их мощности и глубины залегания [Zelt, Smith, 1992]. Глубинность моделирования ограничена 300 м, что обусловлено уменьшением плотности сейсмических лучей ниже этой глубины и, соответственно, снижением достоверности скоростной информации.

В полученных по P -волнам разрезах, которые использовались при изучении скорости распространения S -волн, откольный и нижележащий слои объединены в один (см. рис. 3, *внизу*). Точность результата моделирования оценивается величиной невязок между теоретическими и наблюдаемыми годографами в зависимости от надежности корреляции и определения времен пробега. Величина средней невязки достигает 5–7 мс. При средней длительности видимого полупериода колебаний S -волны около 50 мс (интервал 30–80 мс) такую невязку можно считать приемлемой, соответствующей плотности наблюдений. При этом вероятная ошибка определения скорости достигает ± 0.1 км/с на участках протяженностью не менее 1000 м.

Результаты, полученные ранее по P -волнам в [Беляшов, Суворов, Мельник, 2015], описывают сейсмическую структуру вдоль профиля I в виде трехслойной покрывающей толщи, в которой под зоной малых скоростей по всей длине профиля выделяется техногенный (откольный) слой со скоростью, пониженной до 3.0–3.7 км/с. Выдержанность этого слоя вдоль линии профиля объясняется достаточно плотным расположением взрывных скважин в прилегающей к нему полосе шириной ± 250 м (см. рис. 1).

При подборе параметров разреза уделялось внимание не только величине невязок между наблюдаемыми и теоретическими временами пробега волн, но и длине соответствующих годографов. При этом большое значение имеет градиент скорости в слоях, влияющий на длину теоретических годографов. Наиболее заметно это для первых двух слоев с короткими годографами в первых вступлениях. При моделировании для этих слоев были использованы максимальные значения градиентов скорости (до 0.2 км/с), тогда как в нижележащем слое они понижены до 0.05 км/с, что обеспечивает большую длину прослеживаемых годографов.

Результаты выполненного моделирования приведены в двух разных вариантах – для профиля I (рис. 5, *слева*) с одной протяженной техногенной неоднородностью и для профиля II (рис. 5, *справа*) с двумя локальными неоднородностями.

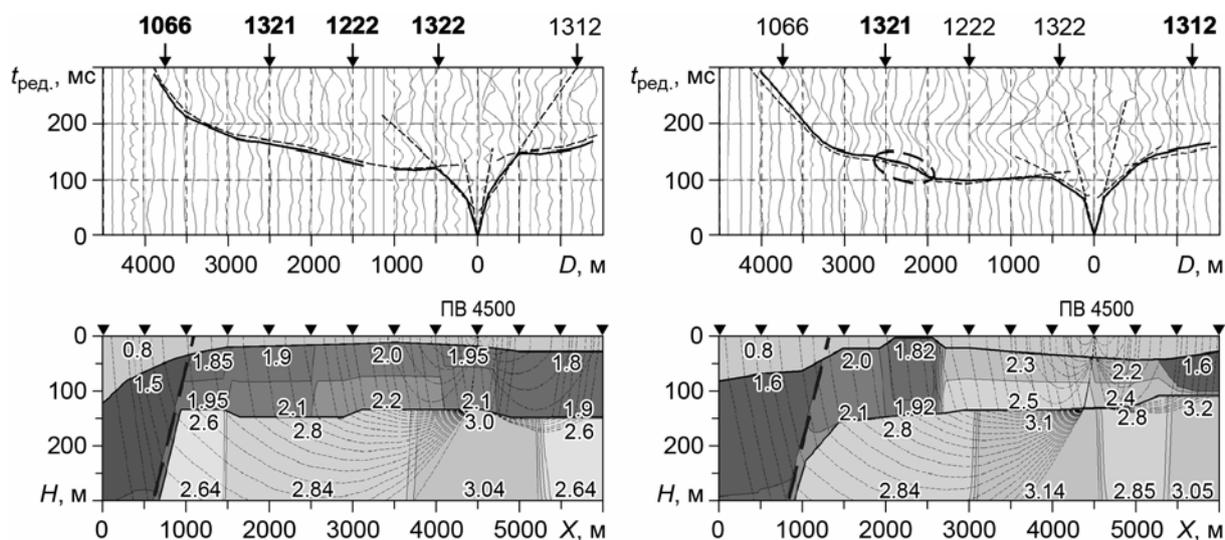


Рис. 5. Результаты моделирования для профилей I (слева, с одной протяженной техногенной неоднородностью) и II (справа, с двумя локальными неоднородностями)

Внизу: разрезы, по которым рассчитывались теоретические годографы S -волн (ПВ 4500, $V_{ред.}=3.0$ км/с); штриховые линии – лучевые траектории распространения волн; сплошные тонкие линии – изолинии скоростей с шагом 0.1 км/с; утолщенные линии – сейсмические границы со скачком скорости; цифры на разрезе – значения скоростей, км/с; толстая штриховая линия – Чинрауский разлом; треугольники над разрезами – пункты возбуждения

Вверху: сопоставление наблюдаемых (сплошные линии) и теоретических (штриховые линии) годографов. Над годографами – номера взрывных скважин (жирным выделены номера скважин, удаленных по нормали от профиля менее чем на 300 м). Овал – граница области локального увеличения времен пробега волн вблизи взрывной скв. 1321

Fig. 5. Simulation results for the profiles I (on the left, with one extended technogenic inhomogeneity) and II (on the right, with two local inhomogeneities)

At the bottom: sections for calculating the theoretical hodographs of S -waves (SP 4500, $V_{ред.}=3.0$ km/s); dashed lines – ray paths of wave propagation; solid thin lines – velocity contours with step of 0.1 km/s; thickened lines – seismic boundaries with a jump in speed; numbers in the section – values of velocities, km/s; thick dashed line – Chinrauskiy fault; triangles over sections – source points

At the top: comparison of the observed (solid lines) and theoretical (dashed lines) hodographs. Above the hodographs are the numbers of blastholes (the numbers that are less than 300 m distant along the normal from the profile are highlighted in bold). Oval is the boundary of the region of local increase in travel time of waves near blasthole 1321

Анализ результатов

В дополнение к представленным выше моделям вдоль профилей I и II рассмотрим сейсмические структуры на профилях IV и VIII с достаточно полными системами наблюдений (рис. 6).

Техногенное влияние ядерных взрывов, приводящее к формированию откольной области [Адушкин, Спивак, 2004], наиболее контрастно прослеживается по данным продольных волн. В этой области по сравнению с сопредельными участками скорость в слое мощностью до 50–100 м под зоной малых скоростей ниже на 0.7–1 км/с. Как уже отмечалось выше, толщину такой неоднородности по данным S -волн в окрестностях пунктов возбуждения выявить не удастся из-за недостаточной плотности наблюдений. Поэтому указанный слой объединен с подстилающим, в котором техногенные изменения

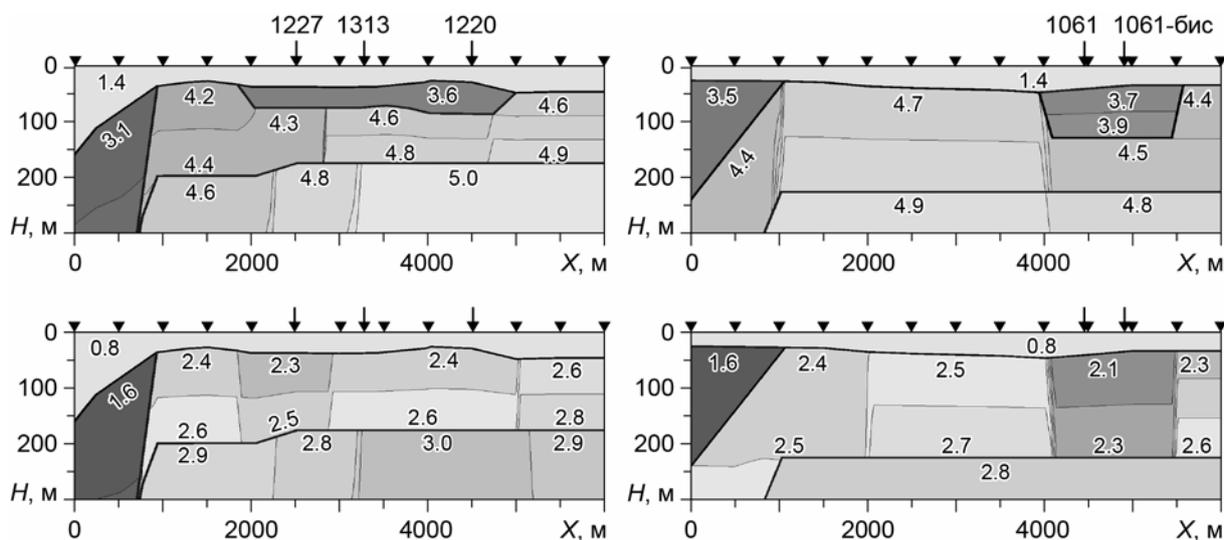


Рис. 6. Результаты моделирования вдоль профилей IV (слева) и VIII (справа) по данным волн P (вверху) и S (внизу). Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. Modeling results along the profiles IV (on the left) and VIII (on the right) according to the data of P (at the top) and S (at the bottom) waves. Legend see in Fig. 5

скорости менее контрастны или не обнаруживаются вовсе. В результате, мощность слоев с признаками техногенных изменений увеличивается до 100–200 м при соответствующем уменьшении перепада скоростей между двумя зонами – ближней к скважинам (подвергшейся воздействию) и удаленной (ненарушенной).

Такой эффект наблюдается на профиле IV, где скорость P -волн в откольной зоне вблизи скв. 1220 на 1.0 км/с ниже, чем на сопредельном участке. При увеличении мощности техногенно измененных зон до 140 м средняя скорость в них составляет 4.2 км/с, тогда как на ненарушенном участке она увеличена до 4.7–4.8 км/с. При этом уменьшение V_P составляет 0.6 км/с, а уменьшение V_S – 0.2 км/с. То, что вблизи скв. 1227 скорость P -волны понижается только на 0.6 км/с, возможно, связано с использованием в этой скважине меньшего заряда, чем в других: скв. 1227 – 44 кт, скв. 1313 – 137 кт, скв. 1220 – 190 кт. При увеличении мощности слоев с признаками техногенных изменений за счет подстилающего слоя средняя скорость P -волн уменьшается до 4.3–4.6 км/с (в соседней ненарушенной области ее значение составляет 4.8 км/с).

Аналогичный эффект, являющийся следствием объединения локальной откольной области с подстилающим слоем, наблюдается и на профиле VIII вблизи скв. 1061 и скв. 1061-бис. Здесь в результате техногенного воздействия средняя скорость P -волны в неоднородности толщиной около 200 м уменьшается до 3.9 км/с. При этом на сопредельных ненарушенных участках вблизи названных скважин скорость повышена и составляет 4.8 км/с (скв. 1061) и 4.6 км/с (скв. 1061-бис). Скорость S -волны понижается на 0.4 км/с (скв. 1061) и на 0.2 км/с (скв. 1061-бис).

Установленное нами увеличение мощности слоя с признаками техногенного изменения на изучаемом участке подтверждается результатами скважинных исследований, при которых для определения скоростей сейсмических волн и плотности пород до взрыва были извлечены их образцы с глубины, превышающей глубину залегания подошвы зоны малых скоростей, которая является кровлей откольной области. Так, для скв. 1222 керн был извлечен с глубины более 70 м.

Таким образом, информация о скоростях сейсмических волн и плотности пород в окрестностях взрывных скважин, получена нами из двух источников. Первый – это данные лабораторного анализа образцов керна, извлеченных из скважин до проведения ядерных взрывов; второй – результаты более поздних сейсмических наблюдений, описывающие характеристики пород после взрывов.

В качестве примера ниже представлены скоростные данные и литологические колонки для двух взрывных скважин, лежащих в полосе между профилями I и II, – скв. 1321 (рис. 7, *слева*) и скв. 1222 (рис. 7, *справа*). Надо отметить, что литологические колонки отображают состав (типы) вскрытых пород для глубин >50 м, в то время как подошва зоны малых скоростей, служащая кровлей области с признаками техногенного изменения пород, залегает на глубине около 20 м. В скв. 1321 (см. рис. 7, *слева*) изменения скорости, связываемые с техногенным воздействием, наблюдаются в интервале от 30 до 150 м. Значения скоростей по сейсмическим данным на этом интервале существенно ниже скоростей, определенных по керну: для V_P эта разница составляет до 1.0 км/с, для V_S – $(0.3-0.7)\pm 0.1$ км/с. Значения V_P/V_S , определенные по сейсмическим данным, достигают $(2.1-2.2)\pm 0.1$, что выше значения этого параметра, равного $(1.9-2.0)\pm 0.1$, которое получено по образцам керна.

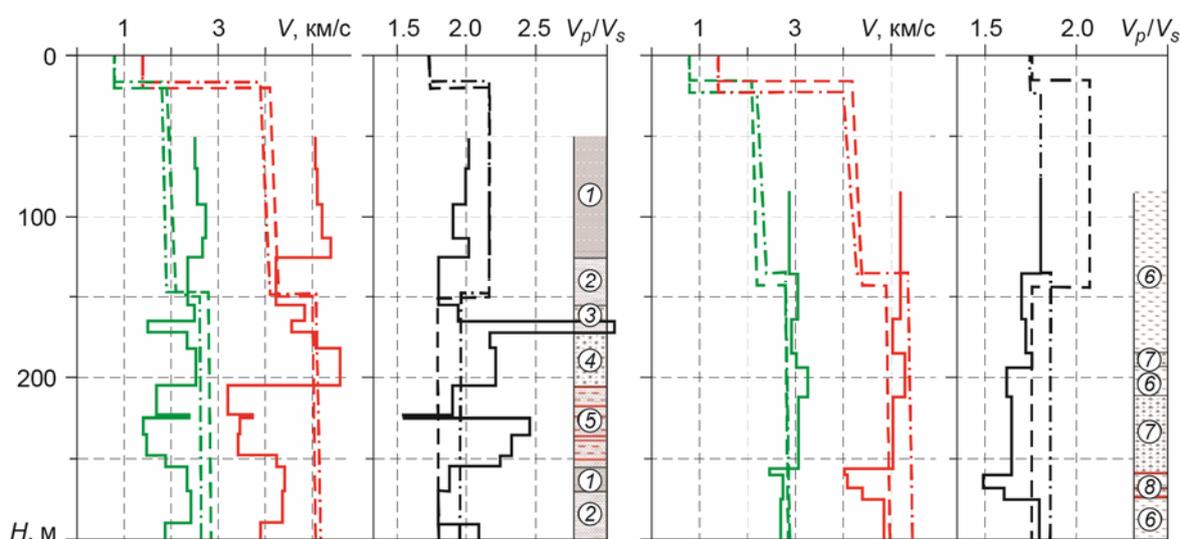


Рис. 7. Скоростные данные для скв. 1321 (*слева*) и скв. 1222 (*справа*), лежащих в полосе между профилями I и II, полученные по измерениям на образцах керна и результатам сейсмических наблюдений, в сопоставлении с литологической колонкой. Красные графики – V_P , км/с, зеленые – V_S , км/с, черные – V_P/V_S : данные измерений на образцах керна (сплошные линии); данные сейсмических наблюдений для профилей I (штриховые) и II (пунктирные)

Литологическая колонка: 1 – песчаник; 2 – алевролит; 3, 4, 7 – порфириды: диоритовый (3), андезитовый (4), диабазовый (7); 5 – алевролит с тектоническим дроблением; 6 – сланцы с прослоями диоритовых порфиридов; 8 – зона тектонического дробления

Fig. 7. Velocity data for well 1321 (*on the left*) and well 1222 (*on the right*), lying in the strip between the profiles I and II, obtained from measurements on core samples and seismic observations, in comparison with the lithological column. Red graphs – V_P , km/s; green – V_S , km/s; black – V_P/V_S : measurements on core samples (solid lines); according to seismic data for profil I (dashed lines) and for profile II (dotted lines)

Lithological column: 1 – sandstone; 2 – siltstone; 3, 4, 7 – porphyrites: diorite (3), andesitic (4), diabase (7); 5 – siltstone with tectonic fragmentation; 6 – shales with interlayers of diorite porphyrites; 8 – zone of tectonic fragmentation

Особого внимания заслуживают результаты, полученные для скв. 1222 (рис. 7, *справа*). В этом случае определенные по результатам сейсмических наблюдений скорости P - и S -волн на 0.5–0.7 км/с ниже скоростей, измеренных на образцах. К сожалению, интересующий нас техногенный сейсмический интервал находится на глубине 30–140 м, тогда как скважинные данные имеются только для глубин >80 м. При этом, если на профиле II значение V_P/V_S равно 1.8 и совпадает с его средней величиной до взрыва, то на профиле I оно повышено до 2.0. Учитывая возможные неточности определения скоростей, ошибку значения V_P/V_S можно оценить как ± 0.1 .

Определенный интерес при изучении природы изменения скоростей сейсмических волн представляет анализ значений коэффициента Пуассона до (ν_0) и после взрыва (ν). По результатам этого анализа на рис. 8, *слева* четко выделяются две группы определений с разными значениями ν . Треугольниками с заливкой отмечены значения ν , повышенные до 0.35, которые получены для скважин, удаленных от профилей на расстояние менее ± 250 м. Треугольники без заливки соответствуют пониженным значениям ν , составляющим в среднем около 0.26, – эти значения получены для взрывных скважин, удаленных от профилей на 250–500 м. Разброс значений коэффициента Пуассона до взрыва достигает 0.20–0.33 при среднем значении ≈ 0.30 ; после взрыва разброс в пределах двух указанных групп оценивается величиной ± 0.015 –0.02, что значительно меньше среднего различия между группами (0.08).

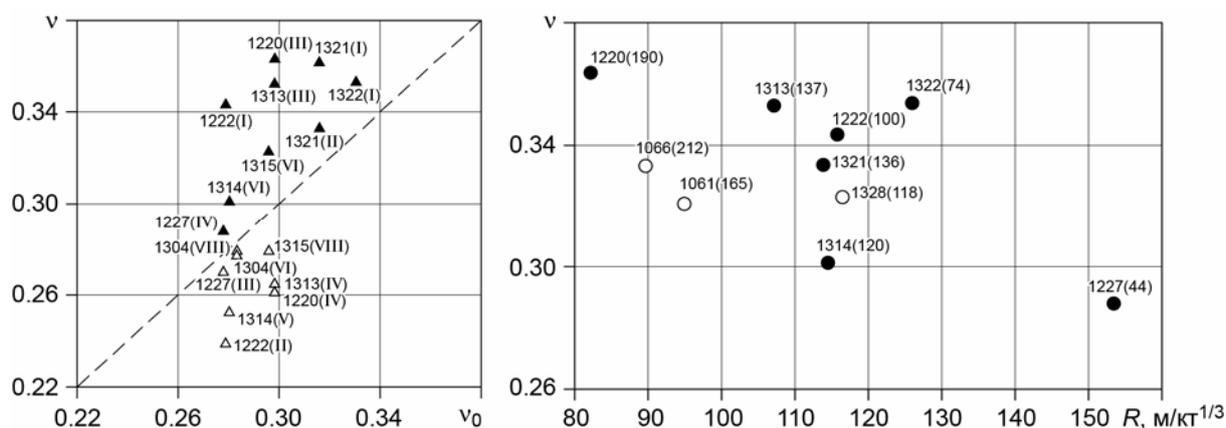


Рис. 8. Слева: соотношение значений коэффициента Пуассона до взрывов (ν_0) и после них (ν) для взрывных скважин, расположенных на расстоянии от ближайшего профиля <250 м (треугольники с заливкой) и на расстоянии 250–600 м (треугольники без заливки); в скобках возле номеров скважин указаны номера профилей

Справа: зависимость коэффициента Пуассона после взрыва (ν) от приведенного гипоцентрального расстояния R , м/кт^{1/3} для взрывных скважин с данными лабораторных измерений на образцах керна (залитые кружки) и без них (кружки без заливки); в скобках возле номеров скважин указана величина зарядов, кт

Fig. 8. On the left: relation of Poisson's ratio before explosions (ν_0) and after them (ν) for blastholes located at a distance from the nearest profile of <250 m (triangles with filling) and at a distance of 250–600 m (triangles without filling); in brackets next to the well numbers are the profile numbers

On the right: dependence of the Poisson's ratio after the explosion (ν) on the given hypocentral distance R , м/кт^{1/3} for blastholes without laboratory measurements on core samples (circles without filling) and for wells with laboratory measurements (circles with filling); in brackets near the numbers of wells the charge value of is indicated, кт

Таким образом, наблюдаемое различие между группами сейсмических данных после взрыва можно считать значимым и обусловленным техногенными изменениями среды, которое зависит и от удаления скважин от профиля.

Рассмотрим влияние ядерных взрывов на коэффициент Пуассона в зависимости от приведенного гипоцентрального расстояния $R=L/q^{1/3}$, где L – расстояние по нормали от ближайшего профиля до точки заложения заряда, м; q – вес заряда, кг. При значительном разбросе данных можно выделить область, характеризующуюся повышенными значениями коэффициента Пуассона после взрыва при пониженных значениях R (повышенной величине заряда). Учитывая данные вблизи скв. 1227(44) (в скобках указана величина заряда q , кг), можно предположить общий тренд снижения коэффициента Пуассона с увеличением R , который, возможно, связан с изменением типа горных пород. Наибольшая величина ν отмечена для скв. 1220, расположенной в хрупких интрузивных гранитах, при максимальном весе заряда (до 190 кг), помещенном на глубину около 480 м [Русинова, Беляшов, Ларина, 2013]. Минимальное значение ν установлено для скв. 1227 с наименьшей величиной заряда.

Наибольшие значения ν при промежуточных значениях R отмечены для скважин 1222, 1321 и 1322, расположенных вблизи профилей I и II (см. рис. 1), где свойства пород и до взрыва являются аномальными. Так, в скв. 1222 данные, полученные на образцах песчаника, характеризуют только нижнюю половину области техногенных изменений при аномально низких значениях коэффициента Пуассона до взрыва ($\nu_0=0.28$) и его максимальных значениях после взрыва ($\nu\approx 0.34$) (см. рис. 8, слева). В скв. 1322 породы гранодиоритового типа характеризуются повышенными значениями коэффициента Пуассона до и после взрыва – $\nu_0=0.33$ и $\nu=0.35$. Это может быть обусловлено особыми механическими свойствами вскрытых скважиной пород. В скв. 1321, находящейся на одинаковом расстоянии от профилей I и II, техногенный интервал представлен песчаниками с разными значениями коэффициента Пуассона, определенными для профилей I ($\nu=0.36$) и II ($\nu=0.33$). Эти различия могут быть объяснены как тем, что на профиле I техногенное влияние определялось в ближней зоне взрыва, а на профиле II в дальней (см. рис. 4, 5), так и влиянием латеральных изменений механических свойств песчаника. В целом, наблюдается сложная зависимость коэффициента Пуассона после взрыва от величины приведенного гипоцентрального расстояния, при том, что различия между значениями коэффициента Пуассона до взрыва и после него являются значимыми (см. рис. 8, слева).

В этой связи представляет интерес оценка степени техногенного влияния взрывов на горные породы в приближении пористо-трещиноватых моделей сред. Для этой оценки использованы результаты, полученные в [Kachanov, 1993; Shafiro, Kachanov, 1997; Fortin, Guéguen, Schubnel, 2007; Guéguen, Kachanov, 2011] на базе уравнений, описывающих смешанное влияние невзаимодействующей сфероидальной пористости и изменяющейся круговой трещиноватости водонасыщенных моделей сред на величину отношения эффективных упругих модулей сжатия и сдвига K_0 , G_0 в упругой матрице и в зависимости от параметров пористости и трещиноватости (K , G):

$$\frac{K_0}{K} = 1 + \rho \frac{h}{1 - 2\nu_0} \left\{ 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{\nu_0}{2} \right) \frac{\delta}{1 + \delta} \right] \right\} + p \frac{3(1 - \nu_0)}{2(1 - 2\nu_0)} \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \delta_s} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{G_0}{G} = 1 + \rho \frac{h}{1 + \nu_0} \left\{ 1 - \frac{2}{5} \left[1 - \left(1 - \frac{\nu_0}{2} \right) \frac{\delta}{1 + \delta} \right] \right\} + p \frac{15(1 - \nu_0)}{7 - 5\nu_0}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{1}{V} \sum a^{(m)3}$ – эффективная плотность трещин (здесь $a^{(m)}$ – радиус круговых трещин при $m=1, \dots, N$); N – общее количество трещин в элементарном объеме V); ν_0 – значение коэффициента Пуассона до взрыва; p – коэффициент сфероидальной пористости (для расчетов принято значение 1 %); $h = \frac{16(1-\nu_0^2)}{9(1-\nu_0/2)}$ – параметр, описы-

вающий геометрию трещин; $\delta = \left(1 - \frac{\nu_0}{2}\right) \frac{E_0 \zeta}{K_f} h$ – параметр, характеризующий взаимо-

связь между напряжением в породе и давлением жидкости при значении модуля Юнга E_0 до взрыва (K_f – модуль сжатия жидкости, принимаемый для воды равным 2 ГПа; ζ – отношение горизонтального и вертикального размеров круговых трещин);

$\delta_s = \frac{2}{9} \frac{K_f \left(\frac{E_0}{1-\nu_0} - 3(1-2\nu_0)\right)}{1-\nu_0}$ – параметр, объединяющий жесткость твердого скелета, сжимае-

мость жидкости и геометрию пор.

Взяв отношение правых и левых частей уравнений (1) и (2) для K_0/K и G_0/G [Fortin, Guéguen, Schubnel, 2007], получим произведение $(K_0/G_0) \cdot (G/K)$, в котором отсутствуют сведения о возможных изменениях значений плотности до и после взрыва. При этом эффективная (модельная) величина такого произведения может быть определена по значениям соответствующих скоростей продольных и поперечных волн, что в модельной смеси сфероидальной пористости и трещиноватости круговой формы позволяет рассчитать интересующую нас величину эффективной плотности трещин ρ .

В результате простых алгебраических преобразований уравнений (1) и (2) полученное отношение приводится к виду

$$\rho = \frac{\frac{K}{G} - \frac{K_0}{G_0} + p \frac{K}{G} \frac{3(1-\nu_0)}{2(1-2\nu_0)} \left\{1 - \frac{1}{1+\delta_s}\right\} - p \frac{K_0}{G_0} \frac{15(1-\nu_0)}{7-5\nu_0}}{\frac{K_0}{G_0} \frac{h}{1+\nu_0} \left\{1 - \frac{2}{5} \left[1 - \left(1 - \frac{\nu_0}{2}\right) \frac{\delta}{1+\delta}\right]\right\} - \frac{K}{G} \frac{h}{1-2\nu_0} \left\{1 - \left[1 - \left(1 - \frac{\nu_0}{2}\right) \frac{\delta}{1+\delta}\right]\right\}}. \quad (3)$$

Увеличение рассчитанной по формуле (3) плотности трещин с ростом коэффициента Пуассона после взрыва для подавляющего большинства скважин достаточно уверенно аппроксимируется положительным трендом ее изменения (рис. 9). Высокое значение ν и максимальная плотность трещин (0.45) при этом наблюдаются в окрестности скв. 1220, геологический разрез которой представлен гранитами. Повышенное значение коэффициента Пуассона наблюдается также в окрестности скв. 1322, вмещающая среда в которой представлена гранодиоритами, относящимися к классу хрупких горных пород. Плотность трещин в этой скважине существенно понижена. Известно, что гранодиориты отличаются повышенными значениями модуля Юнга и сопротивления растяжению, в 1.5–3 раза превышающими эти параметры в других скважинах. Все это свидетельствует о том, что породы с повышенным значением коэффициента Пуассона после взрыва (0.35) отличаются хрупкостью. Кроме того, в пределах всего глубинного интервала до взрыва породы отличались высокой тектонической трещиноватостью (12 трещин на 1 см) и повышенным коэффициентом пористости (10.6 %), что обусловило относительно невысокую добавленную плотность трещин (0.17) под воздействием ядерного взрыва.

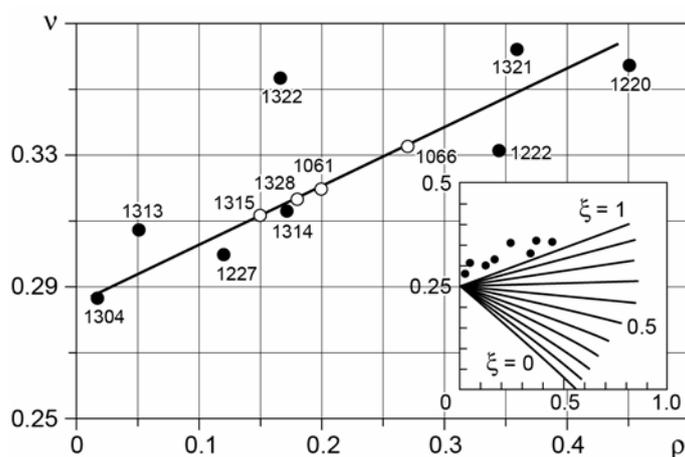


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента Пуассона после взрыва (v) от плотности трещин (ρ). Результаты оценки техногенной плотности трещин (кружки с заливкой) и ее прогнозные значения во взрывных скважинах без лабораторных измерений на образцах керна (кружки без заливки). Черная линия – аппроксимирующая прямая, описываемая уравнением $y = 0.1597x + 0.2878$ (величина заданной аппроксимации $R^2=0.8747$)

На врезке: диаграмма, иллюстрирующая аналогичную зависимость при изменении объема водонасыщенной фракции трещин; ξ – степень водонасыщенности вмещающей горной породы от 0 до 1 (по [O'Connell, Budiansky, 1974] с изменениями)

Fig. 9. The dependence of the change in Poisson's ratio after the explosion (v) on the density of cracks (ρ). Assessment results of the technogenic density of cracks (circles with filling) and its predicted values in blasthole without laboratory measurements on core samples (circles without filling). The black line is the approximating line described by the equation $y = 0.1597x + 0.2878$ ($R^2=0.8747$ is the value of the given approximation)

On the inset: a diagram illustrating the similar dependence when the volume of the water-saturated fraction of cracks changes; ξ – the degree of water saturation of the host rock from 0 to 1 (according to [O'Connell, Budiansky, 1974] as amended)

Дополним эти результаты оценкой доли водонасыщенных трещин по отношению к общему их количеству в зависимости от коэффициента Пуассона и общей плотности трещин в модели [O'Connell, Budiansky, 1974]. Характерная особенность этой оценки – линейная зависимость между рассматриваемыми параметрами (см. врезка на рис. 9).

В нашем случае наблюдаемое значение коэффициента Пуассона при нулевой плотности трещин составляет 0.28. Его изменения с ростом трещиноватости приближаются к значениям, соответствующим полной водонасыщенности (1.0). Это согласуется с аналогичными тенденциями влияния влагонасыщенной трещиноватости на коэффициент Пуассона, установленными в [O'Connell, Budiansky, 1974; Shearer, 1988; Wang et al., 2012].

В соответствии с выявленной тенденцией, на карте площадного распределения техногенной трещиноватости (рис. 10) участки с повышенными значениями ρ приурочены к скважинам с зарядами более 100 кт вне видимой связи с геологическими неоднородностями. Так, область повышенной трещиноватости (ρ до 0.3) с наибольшей плотностью взрывных скважин вблизи профиля I прослеживается в виде двух ответвлений сложной формы, протягивающихся до профилей II, III и даже IV. Еще одна область повышенной трещиноватости находится между профилями VI и VII на расстоянии от 3000 до 5500 метров от их начала. В окрестностях скв. 1314 и скв. 1328 значения ρ приближаются к 0.2.

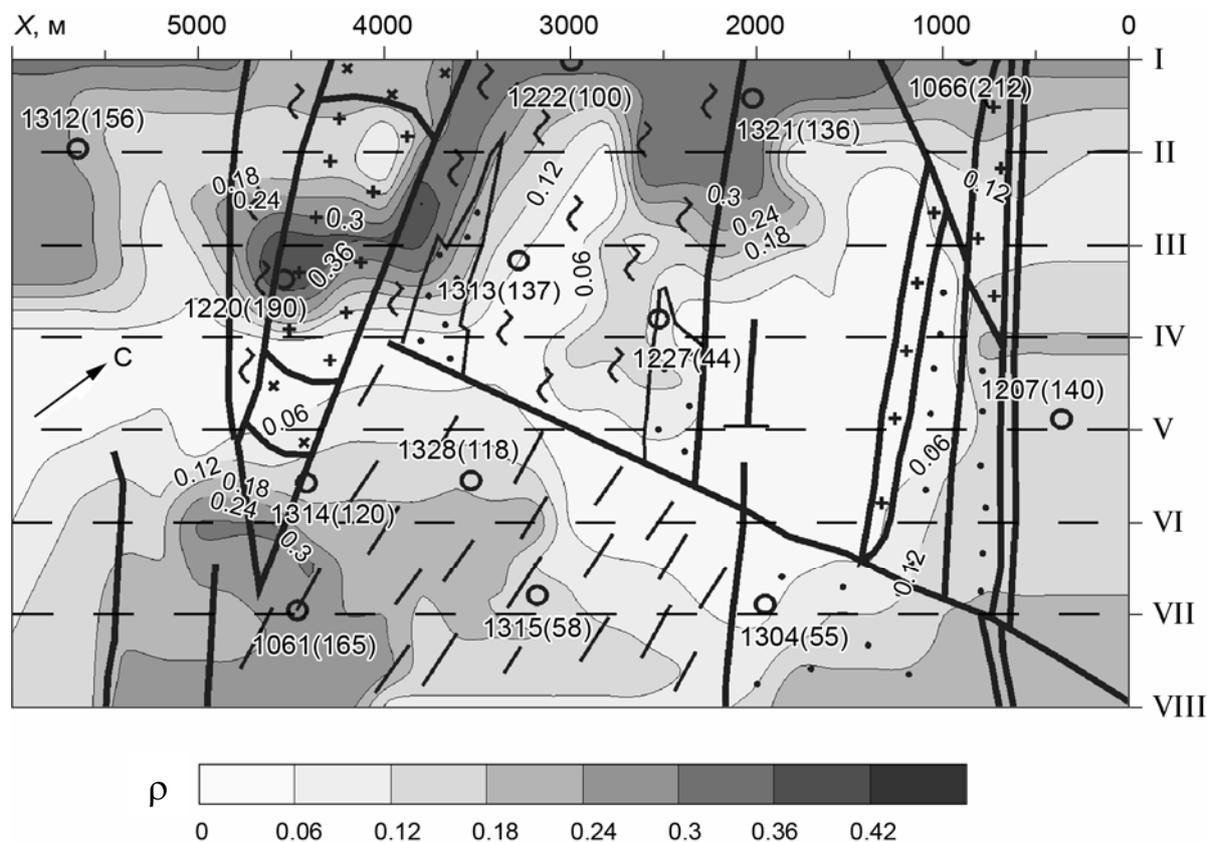


Рис. 10. Карта площадного распределения техногенной трещиноватости, совмещенная с геолого-тектонической схемой исследуемого участка (условные обозначения см. на рис. 1). В скобках после номеров взрывных скважин указана величина заряда, кг. Шкала отображает значения эффективной плотности трещин ρ

Fig. 10. Map of the area distribution of technogenic fracture, combined with the geological and tectonic diagram of the studied area (see legend in Fig. 1). In brackets the blasting charge value is indicated after the numbers of blastholes, kt. The scale displays the effective crack density ρ

Вполне вероятно, что увеличение значения ρ до 0.3 вблизи скв. 1061 вызвано использованием в ней заряда мощностью, более высокой по сравнению с другими скважинами (165 кг). Участок с пониженной трещиноватостью ($\rho=0.1$), прослеженный между профилями V и VIII на расстоянии от 1000 до 2500 метров от начала профилей, соответствует скважинам с величиной заряда до 44–58 кг.

Заключение

Проведенные на участке Семипалатинского испытательного полигона сейсмические исследования позволили оценить состояние верхней части геологического разреза, подвергшейся воздействию подземных ядерных взрывов. В скоростных моделях, построенных методом прямого лучевого трассирования, выделены техногенно-измененные неоднородности, соответствующие областям откольных проявлений [Адушкин, Стивак, 2004]. Скорости сейсмических волн в таких неоднородностях ниже скоростей, определенных для той же среды до взрыва: для продольных волн эта разница составляет до 1.0 км/с, для поперечных – до 0.5 км/с. В соответствии с этим, в неоднородностях повышены значения отношения V_p/V_s (на 10 %) и коэффициента Пуассона (в среднем

от 0.28 до 0.36). Существенного влияния типа вмещающих горных пород на степень техногенной нарушенности среды не обнаружено. Следовательно, в случае ядерных взрывов повышенной мощности основное влияние на степень техногенного разрушения верхней части геологического разреза оказывают инженерно-технические параметры – мощность заряда и глубина его заложения.

Для оценки степени техногенного влияния на окружающую среду с использованием результатов анализа скважинных образцов до взрывов был рассчитан параметр наведенной плотности трещин, величина которого меняется в диапазоне 0.01–0.45. Отмечено, что с ростом плотности трещин увеличивается коэффициент Пуассона после взрыва до значений от 0.3 до 0.36, характерных для разуплотненных флюидонасыщенных сред.

При более детальном изучении зависимости коэффициента Пуассона после взрыва от приведенного эпицентрального расстояния (нормированного на величину заряда) можно надеяться на получение оценки технических параметров взрыва – мощности заряда и глубины его заложения, которые, как уже отмечалось, влияют на степень техногенного нарушения среды. Такой подход представляется полезным при геоэкологических исследованиях в местах проведения подземных ядерных взрывов.

В ходе обработки сейсмических данных выявлены некоторые недостатки использованной системы наблюдений. В частности, длина профилей не позволила по данным первых вступлений обеспечить необходимую глубинность для изучения очаговых зон подземных ядерных взрывов, производимых на глубине 500–600 м. Редкий шаг между пунктами возбуждения колебаний (500 м) и пунктами наблюдения на профилях (125 м) существенно ограничил разрешающую способность сейсмического метода.

Из отмеченного следует вывод, что для получения надежной сейсмической информации с необходимым разрешением для глубин до 600–700 м необходимо увеличение длины годографов и уменьшение расстояния как между пунктами возбуждения, так и между пунктами приема колебаний. Кроме того, для обоснованного построения трехмерных моделей в областях с проведенными подземными ядерными взрывами целесообразно применение площадных систем наблюдений. В современных условиях при картировании зон с повышенной техногенной трещиноватостью, контролирующей проницаемость среды и пути движения грунтовых вод, требуемые глубина и разрешающая способность могут быть обеспечены использованием цифровых многоканальных станций и интенсивных источников сейсмических колебаний.

Исследование выполнено при поддержке проекта № 0331-2019-0006 “Структуры и напряженно-деформированное состояние земной коры платформенных и складчатых областей Центральной Азии на основе совместного решения обратных задач сейсмологии и гравиметрии” программы фундаментальных научных исследований (ФНИ).

Литература

- Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993. 319 с.
- 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.
- Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М., Валько В.В., Галиев А.М. Механическое действие ядерного взрыва. М.: Физматлит, 2003. 550 с. ISBN 5-9221-0261-3.
- 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.

- Беляшов А.В., Суворов В.Д., Мельник Е.А. Техногенно-измененные приповерхностные породы на участке Семипалатинского испытательного полигона: характеристика по сейсмическим данным // Технологии сейсморазведки. 2015. № 1. С.106–110.
- Беляшов А.В., Суворов В.Д., Мельник Е.А., Шелехова О.Х., Ларина Т.Г. Скоростная характеристика верхней части разреза на участке Семипалатинского испытательного полигона по поперечным волнам // Вестник НЯЦ РК. 2017. № 2. С.126–132.
- Ергалиев Г.Х., Мясников А.К., Никитина О.И., Сергеева Л.В. Геологическое строение территории Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2000. № 2. С.139–148.
- Комлев А.В., Зеленский К.Л., Кокежанов Б.А., Кириллов А.В. Изучение возможных путей миграции трития в бассейн реки Шаган // Вестник НЯЦ РК. 2013. № 4. С.96–101.
- Мукушева М.К., Спиридонов С.И., Тлябаев М.Б., Шубина О.А., Баранов С.А., Епифанова И.Э. Моделирование миграции долгоживущего радионуклида ^{90}Sr подземными водами для территории, прилегающей к технической площадке “Балапан” // Вестник НЯЦ РК. 2006. № 2. С.111–117.
- Русинова Л.А., Беляшов А.В., Ларина Т.Г. Изучение скоростных характеристик среды в районе скважины 1220 Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2013. № 1. С.116–125.
- Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с. ISBN 5-02-032960-6.
- Субботин С.Б., Романенко В.В., Новикова Е.А., Бахтин Л.В. Исследование путей и механизмов загрязнения техногенными радионуклидами вод реки Шаган (по результатам 2011–2012 гг.) // Вестник НЯЦ РК. 2013. № 4. С.81–89.
- Субботин С.Б., Зеленский К.Л., Новикова Е.А., Бахтин Л.В., Горбунова Э.М. Влияние последствий проведения ПЯВ на состояние подземных вод в зоне влияния Калба-Чингизского разлома // Вестник НЯЦ РК. 2017. № 4. С.43–51.
- Суворов В.Д., Беляшов А.В. Скоростные параметры среды в местах проведения подземных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне // Вестник НЯЦ РК. 2012. № 2. С.101–107.
- Такибаев Ж.С. Рабочая модель миграции радионуклидов из мест подземных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2003. № 3. С.37–43.
- Ядерные испытания СССР. Т. I. Цели. Общие характеристики. Организация ядерных испытаний СССР. Первые ядерные испытания / Под ред. В.Н. Михайлова и др. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. 288 с. ISBN: 5-85165-062-1
- Belyashov A., Suvorov V., Melnik E. UNE’s subsurface signatures, detected by active seismic surveys at the Semipalatinsk Test site // CTBT Science and Technology Conference, Book of abstracts. 2019. P.89.
- Fortin J., Guéguen Y., Schubnel A. Effects of pore collapse and grain crushing on ultrasonic velocities and V_p/V_s // Journal of Geophysical Research. 2007. V. 112. P.1–16.
- Guéguen Y., Kachanov M. Effective Elastic Properties of Cracked Rocks – An Overview // Mechanics of Crustal Rocks. Vienna: Springer, 2011. P.73–125.
- Kachanov M. Elastic solids with many cracks and related problems // Adv. Appl. Mech. 1993. N 30. P.259–445.
- O’Connell R., Budiansky B. Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids // Journal of Geophysical Research. 1974. V. 79, N 35. P.5412–5426.
- Shafiro B., Kachanov M. Materials with fluid-filled pores of various shapes: Effective elastic properties and fluid pressure polarization // Int. J. Solids Struct. 1997. N 34. P.3517–3540.
- Shearer P. Cracked media, Poisson’s ratio and the structure of the upper oceanic crust // Geophysical Journal International. 1988. V. 92, N 2. P.357–362.
- Wang, X.-Q., Schubnel A., Fortin J., David E.C., Gueguen Y., Ge H.-K. High V_p/V_s ratio: Saturated cracks or anisotropy effects? // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. P.1–6.
- Zelt C.A., Smith R.B. Seismic travel time inversion for 2-D crustal velocity structure // Geophysical Journal International. 1992. V. 108. P.16–34.

Сведения об авторах

БЕЛЯШОВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: +7(383) 333-29-00. E-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

СУВОРОВ Владимир Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: +7(383) 333-29-00. E-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

МЕЛЬНИК Елена Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: +7(383) 333-29-00. E-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

SUBSURFACE TECHNOGENIC SEISMIC HETEROGENEITIES AT THE PLACES OF THE UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS (SEMIPALATINSK TEST SITE)

A.V. Belyashov, V.D. Suvorov, E.A. Melnik

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract. Seismic observations made in 1997 at one of the sections of the Semipalatinsk test site by the method of refracted waves are presented to determine the velocity structure of the upper part of the section to a depth of 300 m and to define the position of the permeable zones, through which the radioactive substances from nuclear explosive camouflet could be transported into environment. There are 14 vertical wells in the study area, where in 1972–1987 underground nuclear explosions were carried out. Seismic observations have been made along 8 parallel profiles; length of each profile was 6 km, distance between the profiles – 500 m, distance between the shot points – 500 m, between the receivers – 125 m. Chemical explosives with the weight up to 40 kg were used for the elastic waves' generation. Velocity sections were built using ray tracing method and *SeisWide* software.

Near-surface technogenic anomalies have been traced to the depths of 150 m within the underground nuclear explosions epicentral areas with radius up to 250 m. These anomalies are characterized by decrease of seismic waves velocity – up to 1.0 km/s for *P*-waves and up to 0.5 km/s for *S*-waves. Horizontal dimensions of the selected areas vary from 500 m for the single explosions to 4–5 km under the conditions of close spacing of the nuclear boreholes along the profiles. In these areas, Poisson's ratio is an average 0.35 ± 0.02 , exceeding its values determined by core samples from wells before the nuclear explosions (0.29 ± 0.03). Stable correlation was established between the calculated technogenic crack density and the value of the Poisson's ratio after the explosion. Spatial changes of induced fracturing are determined by the nuclear charges without any explicit dependence on the geological structure of the area.

Keywords: Semipalatinsk test site, underground nuclear explosions, seismic method of first arrivals, primary and shear waves velocity.

References

- Adushkin V.V., Spivak A.A., *Geomechanics of large-scale explosions*, Moscow: Nedra, 1993, 319 p.
Adushkin V.V., Spivak A.A., Changes in Properties of Rock Massifs Due to Underground Nuclear Explosions, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 624-634.

- Archipov V.N., Borisov V.A., Budkov A.M., Valko V.V., Galiev A.M., *Nuclear explosion's mechanical impact*, Moscow: Physmatlit, 2003, 384 p., ISBN 5-9221-0261-3.
- Belyashov A.V., Suvorov V.D., Melnik E.A., Seismic study of Semipalatinsk test site area near-surface section, *Seismic Technologies*, 2013, no. 3, pp. 64-75.
- Belyashov A.V., Suvorov V.D., Melnik E.A., Technogenically changed near-surface rocks of Semipalatinsk test site based on seismic data, *Seismic Technologies*, 2015, no. 1, pp. 106-110.
- Belyashov A., Suvorov V., Melnik E., UNE's subsurface signatures, detected by active seismic surveys at the Semipalatinsk Test site, *CTBT Science and Technology Conference, Book of abstracts*, 2019, pp. 89.
- Belyashov A.V., Suvorov V.D., Melnik E.A., Shelekhova O.Kh., Larina T.G., Velocity characteristics of the upper part of the section at Semipalatinsk test site on S-waves, *NNC RK Bulletin*, 2017, no. 2, pp. 126-132.
- Ergaliev G.Kh., Myasnikov A.K., Nikitina O.I., Sergeeva L.V., Geologic Structure of Semipalatinsk Test Site Territory, *NNC RK Bulletin*, 2000, no. 2, pp. 139-148.
- Fortin J., Guéguen Y., Schubnel A., Effects of pore collapse and grain crushing on ultrasonic velocities and V_p/V_s , *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, pp. 1-16.
- Guéguen Y., Kachanov M., Effective Elastic Properties of Cracked Rocks – An Overview, *Mechanics of Crustal Rocks*, Vienna: Springer, 2011, pp.73-125.
- Jadernye ispytaniya SSSR. Tom I: Celi. Obshhie harakteristiki. Organizaciya jadernyh ispytanij SSSR. Pervye jadernye ispytaniya* (USSR Nuclear Tests. vol. I: Purposes. Common features. Organization of the USSR nuclear tests. First nuclear tests). RFNC-VNIIEF, 1997, 288 p., ISBN: 5-85165-062-1. [in Russian].
- Kachanov M., Elastic solids with many cracks and related problems, *Adv. Appl. Mech.*, 1993, no. 30, pp. 259-445.
- Komlev A.V., Zelensky K.L., Kokezhanov B.A., Kirillov A.V., Studying of probable migration paths of tritium in the basin of Shagan river, *NNC RK Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 96-101.
- Mukusheva M.K., Spiridonov S.I., Tlebaev M.B., Shubina O.A., Baranov S.A., Epifanova I.E., Modeling of ^{90}Sr long-lived radionuclide migration by ground water at the territory adjacent to Balapan technical site, *NNC RK Bulletin*, 2006, no. 2, pp. 111-117.
- O'Connell R., Budiansky B., Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids, *Journal of Geophysical Research*, 1974, vol. 79, no. 35, pp. 5412-5426.
- Rusinova L.A., Belyashov A.V., Larina T.G., Studies of 1220 borehole geological media velocity parameters (Semipalatinsk test site), *NNC RK Bulletin*, 2013, no. 1, pp. 116-125.
- Sadovsky M.A., *Izbrannye trudy: Geofizika i fizika vzryva* (Selected works: Geophysics and Physics of Explosion), Moscow: Nauka, 2004, 440 p., ISBN 5-02-032960-6.
- Shafiro B., Kachanov M., Materials with fluid-filled pores of various shapes: Effective elastic properties and fluid pressure polarization, *Int. J. Solids Struct.*, 1997, no. 34, pp. 3517-3540.
- Shearer P., Cracked media, Poisson's ratio and the structure of the upper oceanic crust, *Geophysical Journal International*, 1988, vol. 92, no. 2, pp. 357-362.
- Subbotin S.B., Romanenko V.V., Novikova E.A., Bakhtin L.V., Pathways and mechanisms of Shagan river water pollution with artificial radionuclides (2011–2012 results), *NNC RK Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 81-89.
- Subbotin S.B., Zelensky K.L., Novikova Ye.A., Bakhtin L.V., Gorbunova E.M., Impact by one consequences on ground water state in the zone affected by Kalba-Chingiz rift, *NNC RK Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 43-51.
- Suvorov V.D., Belyashov A.V., Velocity parameters of media in underground explosion areas in Semipalatinsk test site, *NNC RK Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 101-107.
- Takibaev Zh.S., Working model for radionuclide migration from underground nuclear explosion (UNE) locations, *NNC RK Bulletin*, 2003, no. 3, pp. 37-43.
- Wang, X.-Q., Schubnel A., Fortin J., David E.C., Gueguen Y., Ge H.-K., High V_p/V_s ratio: Saturated cracks or anisotropy effects?, *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, pp. 1-6.
- Zelt C.A., Smith R.B. Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure, *Geophysical Journal International*, 1992, vol. 108, pp. 16-34.