

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.834.8:621.039.9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТВЗРЫВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2018 г. Э. М. Горбунова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер Российской академии наук, Ленинский пр., д. 38, корп. 1, г. Москва, 119334 Россия

\*E-mail: emgorbunova@bk.ru

Поступила в редакцию 19.07.2017 г.

Поствзрывные деформации дневной поверхности выделены на ряде участков площадки Балапан Семипалатинского испытательного полигона по результатам полевых работ – геоморфологического обследования и геодезического нивелирования по профилям. Поверхностная техногенная зональность является косвенным отражением изменения состояния геологической среды. Массовая скорость движения пород выбрана в качестве основного критерия для сравнения изменений относительных отметок дневной поверхности в результате произведенных взрывов и при землетрясениях. Полученные значения смещения и массовой скорости движения пород при взрывах сопоставлены с опубликованными данными по землетрясениям.

**Ключевые слова:** изменение дневной поверхности, относительные отметки, сейсмодислокации, массовая скорость движения, деформация грунта, геодезические данные

**DOI:** 10.1134/S0869780318050010

В 1980–1990-х годах на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) партией 27-й экспедиции 16-го района ФГУГП “Гидропещгеология” выполнялись комплексные исследования по оценке реакции массива на взрывное воздействие. Наряду с изменением основных параметров пород и гидрогеодинамической обстановки при проведении крупномасштабных экспериментов – подземных ядерных взрывов (ПЯВ) [1], отмечены поствзрывные деформации дневной поверхности [4].

На основе результатов геоморфологического обследования участков, расположенных на площадке Балапан СИП, составлялись схемы техногенных изменений дневной поверхности, одна из них представлена в статье [3]. В настоящее время Институт геофизических исследований Республики Казахстан наряду с геолого-геофизическим изучением последствий влияния ПЯВ на состояние массива [12] осуществляет геодезический мониторинг на приустьевых участках боевых скважин [13]. За период наблюдений 2009–2012 гг. на одном из участков установлены разнонаправленные изменения относительных отметок дневной поверхности в эпицентральной зоне – подъем со скоростью 3.4–5.9 мм/год и опускания со скоростью 1.4–4.6 мм/год. Полученные данные указывают на продолжающиеся природно-техногенные процессы.

В сейсмоактивных регионах регистрируются многочисленные сейсмодислокации – результат

деформаций массива грунтов, связанных с землетрясениями и проявляющихся в виде разрывов, смещений, оползней, обвалов и др. [7], которые могут быть обусловлены как основным событием, так и последующими афтершоками [15]. Амплитуды вертикальных и горизонтальных движений пород, зарегистрированные при землетрясениях по данным GPS-наблюдений и результатам полевого обследования эпицентральной зоны, изменяются в широких пределах. В региональных разломах – от первых до десятков сантиметров [16], в межплитных зонах – до первых метров [14]. Виды косейсмических (первичных) изменений дневной поверхности соотносят с механизмом очага землетрясения. Постсейсмические (вторичные) процессы, в том числе гравитационные, могут приводить к активизации оползневых и селевых процессов.

Ограниченное число пунктов наблюдений, в том числе оборудованных GPS-приемниками, в ближней зоне землетрясений, расположенных преимущественно в труднодоступных регионах, и неравномерность их распределения не позволяют сформировать целостное представление об основных параметрах сейсмодислокаций. Не все сейсмодислокации, выделенные по результатам полевых обследований эпицентральных зон землетрясений, могут рассматриваться в качестве косейсмических [16].

Особое значение на данном этапе исследований приобретает изучение поствзрывных дефор-

маций дневной поверхности, сформированных при ПЯВ, которые могут быть сопоставлены с сейсмодислокациями. В качестве основного критерия для сравнения изменений относительных отметок дневной поверхности, зарегистрированных при различных ПЯВ и землетрясениях, выбрана массовая скорость движения пород, которая рассчитана с учетом основных характеристик сейсмических событий — ПЯВ и землетрясений [5]. В статье предложен общий методический подход к выделению техногенных микроформ рельефа в пределах участков проведения ПЯВ на площадке Балапан СИП.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период 1965–1989 гг. на площадке Балапан СИП было проведено 106 подземных ПЯВ мощностью от 16 до 150 кт в скважинах на глубинах от 0,2 до 0,6 км [2]. После взрывов вокруг ряда боевых скважин в эпицентральной зоне радиусом до 1,5 км отмечены поствзрывные деформации дневной поверхности. На основе актуализации архивного материала в качестве объектов исследований выбраны 20 участков расположения боевых скважин, на которых было выполнено геодезическое нивелирование по профилям длиной от 1,8 до 4,6 км до и после ПЯВ.

Площадка Балапан СИП расположена на аллювиально-пролювиальной равнине. Вдоль южной и восточной границ площадки развит долинный комплекс, представленный I надпойменной террасой и поймой р. Чаган. К межсопочным понижениям и впадинам на равнине приурочены озерные отложения.

Абсолютные отметки дневной поверхности снижаются в северо-восточном направлении от 350 до 300 м (см. рис. 1). Дневная поверхность равнины ровная и слабоволнистая, полого наклоненная. Техногенные микроформы рельефа, сформированные ранее проведенными взрывами, выделяются по результатам топогеодезического нивелирования по профилям, как на равнине, так и на склоне террасы.

В пределах площадки Балапан преимущественно распространены герциниды Иртыш-Зайсанского мегасинклинория Казахстанской складчатой системы. В геологическом разрезе выделены два структурных этажа: палеозойский и кайнозойский. В центре территории, в пределах глубоко опущенной грабен-синклинали, ограниченно распространены мезозойские отложения.

На уровне палеозойского фундамента преимущественно развиты терригенные, вулканогенно-осадочные и метаморфизованные образования карбона. В центральной части территории в грабенообразном понижении вскрыты отложения

юрского возраста (рис. 2). Породы метаморфизованы, дислоцированы, смяты в линейные складки, подчиненные генеральному северо-западному простиранию.

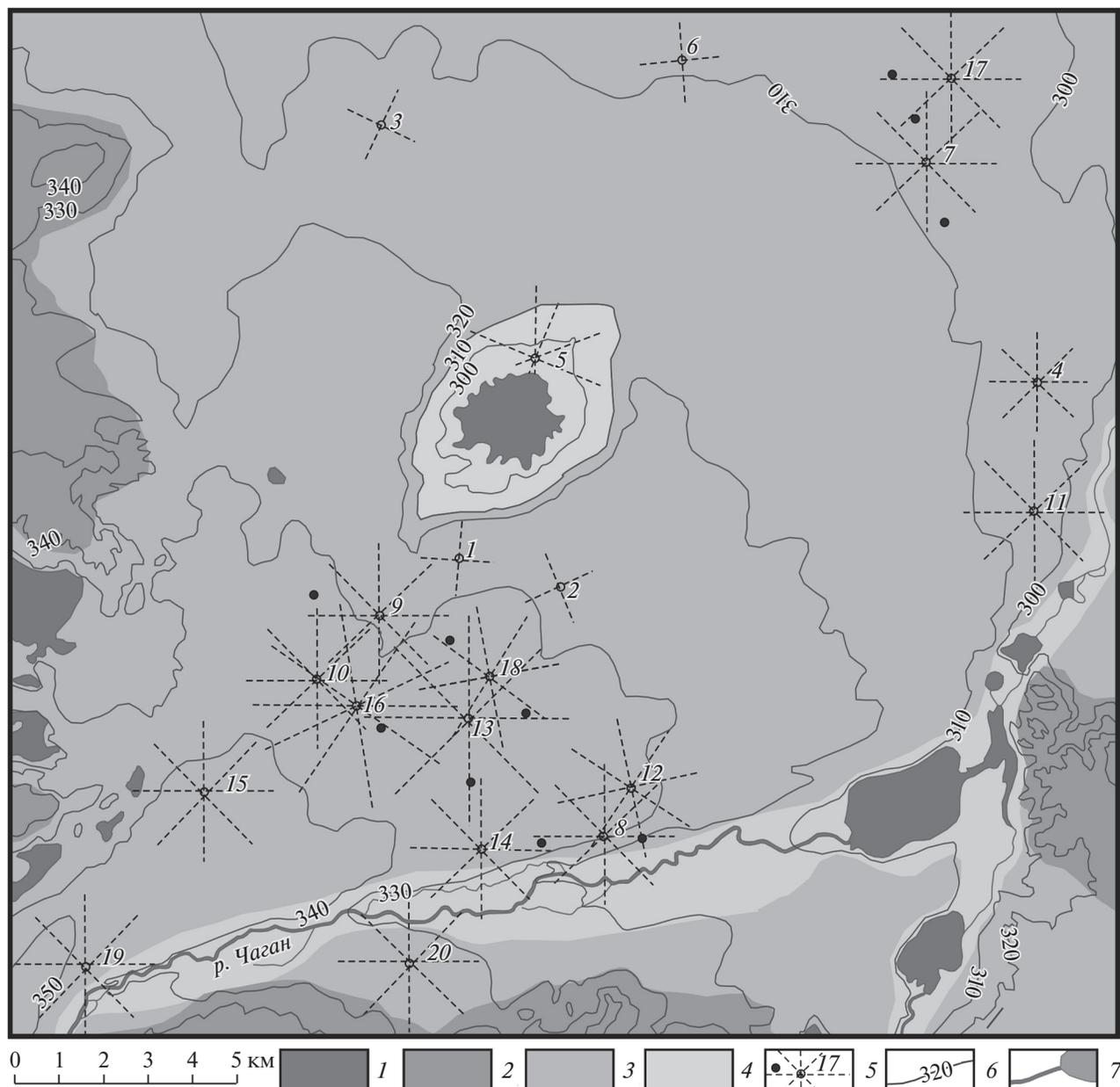
На юго-западе площадки Балапан распространены вулканогенно-осадочные и метаморфизованные отложения кояндинской свиты нижнего карбона ( $C_{1tkn}$ ). В составе свиты в пределах участков исследований преобладают песчаники, алевролиты, сланцы углисто-глинистые, неравномерно трещиноватые, с зонами тектонического дробления. Отложения в различной степени ороговикованы, окремнены, рассланцованы, пронизаны кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками. На северо-востоке площадки в вулканогенно-осадочных отложениях кокпектинской свиты визейского яруса, верхнего подъярус-намурского яруса нижнего карбона ( $C_{1v_3-nkr}$ ) преобладают туфы андезитовых порфиритов, переслаивающиеся с туффитами, неравномерно окварцованные, трещиноватые.

Отложения среднего и верхнего карбона распространены в виде полос шириной до 3 км, вытянутых в северо-западном направлении, ограниченных разрывными нарушениями. Породы буконьской свиты среднего отдела каменноугольной системы ( $C_2bk$ ) приурочены к Жананской зоне смятия, представлены туфопесчаниками, алевролитами. Расположенная западнее майтюбинская свита среднего и верхнего карбона (нерасчлененная) ( $C_{2-3mt}$ ) сформирована конгломератами, песчаниками с подчиненными прослоями алевропелитов.

Отложения юрской системы ( $J_2$ ) ограничено распространены в пределах клиновидного грабена и представлены преимущественно конгломератами с прослоями угля. Элювиальные образования коры выветривания мезозойского возраста ( $eMZ?$ ) сложены глинистым грунтом с щебнем и дресвой коренных пород, распространены локально в виде останцов.

Кайнозойский структурный этаж сформирован преимущественно неогеновыми и четвертичными отложениями. Отложения неогена представлены в основном, глинами, залегающими практически горизонтально. Мощность отложений неогена не выдержана по площади, изменяется от 9 до 54 м в переуглубленных местах. Четвертичные супесчано-суглинистые отложения мощностью 3–15 м, реже до 33 м, распространены повсеместно.

Верхнепалеозойские интрузивные образования сопровождают разрывные нарушения, ограничивающие структурно-формационные зоны, и представлены разнообразными по составу, форме и размерам массивами и жилами, залегающими в ряде случаев непосредственно под отложениями кайнозоя. На юге площадки Балапан на участке



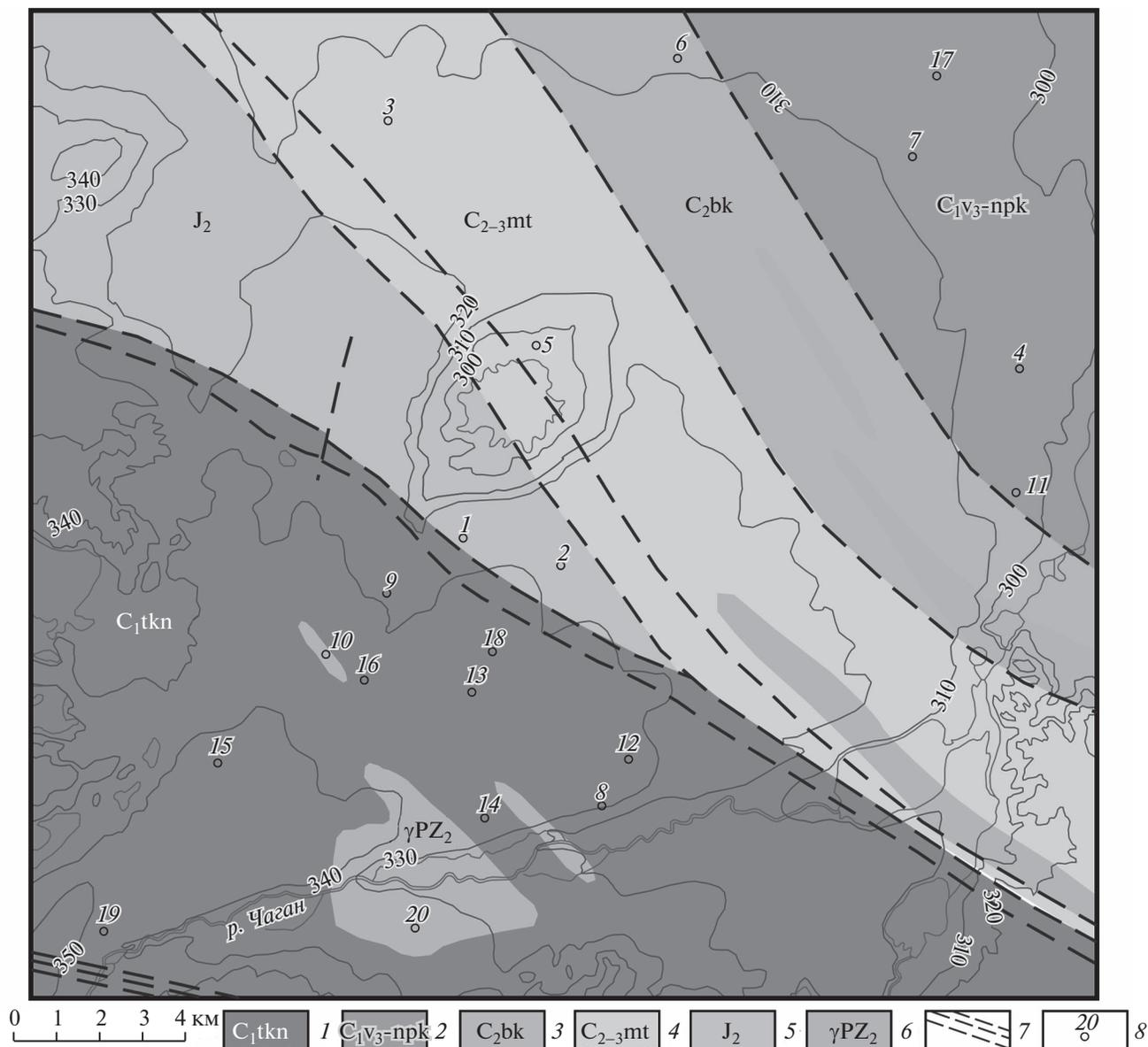
**Рис. 1.** Геоморфологическая схема площадки Балапан СИП. 1 – мелкосопочник, 2 – равнина, 3 – долина, 4 – озерные понижения, 5 – участок исследований (внемасштабным кружком обозначена боевая скважина, в которой проведен ПЯВ: белый кружок соотносен с взрывом, влияние которого на дневную поверхность рассматривается в статье, черным – обозначен взрыв, выполненный на участке до проведения топогеодезических исследований; пунктир – линии профилей; цифра – номер участка, условно присвоенный и соответствующий последовательности дат проведения ПЯВ (здесь и далее); 6 – изогипсы, цифра – абс. отм., м; 7 – гидросеть).

субширотного течения р. Чаган интрузивный массив выходит на поверхность.

### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Для анализа поствзрывных деформаций дневной поверхности были привлечены архивные данные геодезического нивелирования, выпол-

ненного по профилям до и после крупномасштабных взрывов (см. рис. 1). Разбивка профилей на местности осуществлялась для геолого-геофизических работ (сейсмопрофилирование, магниторазведка, электроразведка и др.) и привязки скважин, расположенных на площадке Балапан. Автором статьи с 1983 по 1992 гг. проведено визуальное геоморфологическое обследование участ-



**Рис. 2.** Тектоническая схема площадки Балапан СИП. 1 – вулканогенно-осадочные и метаморфизованные отложения кояндинской свиты нижнего карбона; 2 – вулканогенно-осадочные отложения кокпектинской свиты нижнего карбона; 3 – вулканогенно-осадочные отложения буконьской свиты среднего карбона; 4 – осадочные и метаморфизованные отложения среднего-верхнего карбона; 5 – осадочные отложения юры; 6 – интрузивные образования верхнего палеозоя; 7 – региональные разрывные нарушения; 8 – участок исследований и его номер.

ков проведения ПЯВ с составлением схем, зарисовок, документацией и фотодокументацией техногенных микроформ рельефа.

На участке исследований обычно прокладывались 2–4 профиля длиной от 1.8 до 4.6 км с разбивкой каждого через 115 м, которые пересекались над эпицентром взрыва. Полевые измерения (передача координат и высот на скважины и конечные пикеты геофизических профилей от тригонометрических пунктов государственной сети) выполнялись теодолитом 2ТЗОП и нивелиром НВ-1, обработка материалов – в соответствии с

требованиями инструкции на топографо-геодезические работы.

Результаты нивелирования использовались при построении планов и профилей изменений относительных отметок дневной поверхности. За “ноль” на каждом профиле принято наиболее низкое положение поверхности. Поствзрывные деформации дневной поверхности отчетливо проявляются при сопоставлении профилей до и после взрыва из-за расхождения горизонтального и вертикального масштабов на два порядка. В эпицент-

Таблица 1. Параметры произведенных ПЯВ

Геологический индекс	№ участка исследований*	Основные параметры ПЯВ [2]		
		Дата	P, кт	M <sub>b</sub>
C <sub>1</sub> tkn	8	04.08.1979	<20, <150	6.1
	9	29.06.1980	<20 × 2, <150	5.7
	12	13.09.1981	<150	6.1
	13	18.10.1981	<150, <20	6.1
	14	29.11.1981	<20 × 3	5.7
	15	31.08.1982	<20 × 2	5.3
	16	05.12.1982	<150, <20	6.1
	18	25.04.1984	<150, <20	6.0
	19	27.12.1987	<150, <20	6.1
C <sub>1</sub> v <sub>3</sub> -nkp	4	09.06.1976	<20	5.3
	7	07.07.1979	<150, <20	5.8
	11	29.10.1980	<150, <150	5.9
	17	20.11.1983	<20 × 2	5.5
C <sub>2</sub> bk	6	05.09.1977	<150, <20	5.8
C <sub>2-3</sub> mt	3	25.12.1975	<150	5.7
	5	29.06.1977	<20	5.3
J <sub>2</sub>	1	31.05.1974	<150	5.9
	2	29.10.1975	<150	5.8
γPZ <sub>2</sub>	10	14.09.1980	<150	6.2
	20	14.09.1988	<150	6.1

\* Нумерация участков, расположенных на площадке Балапан СИП, условная и соответствует последовательности дат проведенных взрывов.

тральной зоне выполнен расчет естественного уклона каждого профиля.

$$U_m = \frac{A}{(\bar{r})^n}, \quad (1)$$

При составлении планов и профилей амплитуды подъема и понижения дневной поверхности рассчитаны как разница абсолютных отметок, зарегистрированных вдоль профилей при выполнении топографо-геодезических работ до и после взрыва. Повторное геодезическое нивелирование проводилось через 1–6 месяцев после ПЯВ в зависимости от радиационной обстановки на участке и метеорологических условий. Изменения относительных отметок дневной поверхности по вертикали на ±0.2 м и более принято за внешнюю границу области развития поствзрывных деформаций. На основе дополнительного геоморфологического обследования в пределах отдельных участков выделены зоны с различной интенсивностью развития техногенных микроформ рельефа.

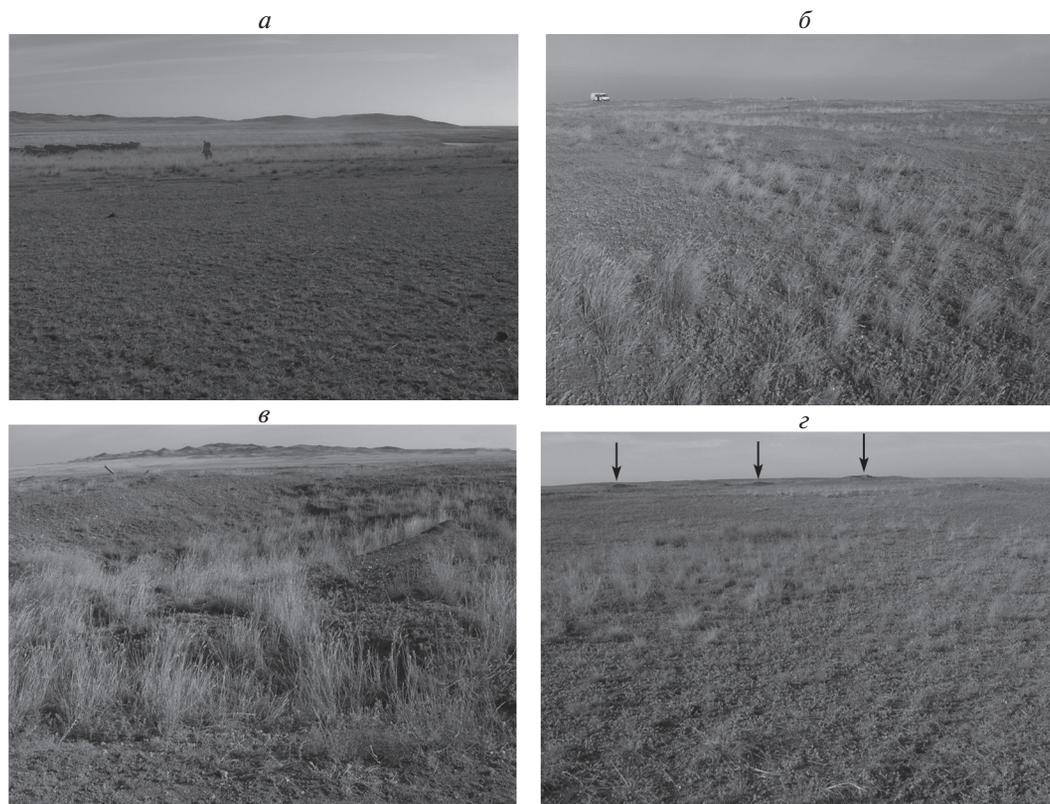
Для сравнения зарегистрированных изменений относительных отметок дневной поверхности, установленных при ПЯВ, рассчитаны массовые скорости движения пород ( $U_m$ ) по формуле, приведенной в монографии [6]:

где  $A$  – параметр, зависящий от свойств породы ( $A = 300–400$ ),  $\bar{r}$  – приведенное расстояние [ $\text{м/кт}^{1/3}$ ],  $n = 1.6–2.0$ . Теоретическая зависимость массовой скорости движения пород от приведенного расстояния (1) получена на основе обобщения экспериментальных данных по регистрации ПЯВ в различных породах и используется при численном моделировании сейсмического действия ПЯВ. Опубликованные данные по параметрам ПЯВ, проведенных в боевых скважинах на участках исследований [2], представлены в таблице 1.

Скорость движения пород при землетрясениях определена по формуле, предложенной в статье [5]:

$$V_m = 0.0012 \frac{10^M}{R^{1.5}}, \quad (2)$$

где  $R$ , км – эпицентральное расстояние, на котором определено изменение дневной поверхности,  $M$  – магнитуда землетрясения.



**Рис. 3.** Общий вид дневной поверхности (*а*) и поствзрывных деформаций (*б–г*) по состоянию на осень 2003 г. (*а* – равнина и долина р. Чаган; *б* – бугры и вытянутые валы без разрыва сплошности пород; *в* – провальное понижение; *г* – зияющие трещины; на заднем плане – сбросы с разрывом сплошности грунта обозначены стрелками).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На данном этапе исследований проведена обработка топогеодезических данных по поствзрывным деформациям поверхности, зарегистрированным на 20-ти участках проведения ПЯВ, расположенных на площадке Балапан СИП (см. рис. 1, табл. 1). В окрестности каждой боевой скважины оконтурены три зоны, различающиеся по степени выраженности поствзрывных деформаций [4]. В эпицентральной зоне I развита интенсивно деформированная, перепланированная поверхность с системой трещин. В зоне II дневная поверхность деформирована локально и представлена непротяженными формами техногенного рельефа. В зоне III почвенно-растительный покров осложнен развитием единичных извилистых трещин, за ее пределами распространена территория, ненарушенная проведением ПЯВ (рис. 3*а*).

Поствзрывные деформации дневной поверхности отмечены в почвенно-растительном покрове в виде техногенных микроформ рельефа по результатам визуального геоморфологического обследования и инструментальных измерений, выполненных на участке до и после проведения ПЯВ.

Основные техногенные микроформы рельефа:

- интенсивное взрыхление пород;
- вспучивание пород со стенкой срыва 0.2–0.7 м и разрывом сплошности протяженностью до 20 м;
- провальные понижения радиусом 2–10 м и глубиной 0.5–0.7 м;
- протяженные извилистые зияющие трещины длиной от первых метров и более 10 м с шириной раскрытия обычно 3–4 см, реже – до 10 см.

Пучения имеют вид бугров и вытянутых валов протяженностью от первых метров до 20 м, шириной 1–2 м, высотой 0.5–1.5 м без разрыва сплошности пород (рис. 3*б*) и с разрывом (рис. 3*г*). Провальные понижения глубиной до 1 м с разрывом и без разрыва сплошности пород имеют овальную форму длиной до 10 м, реже – округлую с радиусом до 3 м (рис. 3*в*). Извилистые трещины прерывистые и протяженные – от первых метров до 20 м с шириной раскрытия 3–4 см, реже до 10 см, различно ориентированные относительно эпицентра взрыва (рис. 3*г*). Подобные микроформы рельефа прослеживаются и при землетрясениях [8, 14–16], поэтому в статье приведена терминология, которая используется при макросейсмическом обследовании эпицентральной зоны землетрясений.

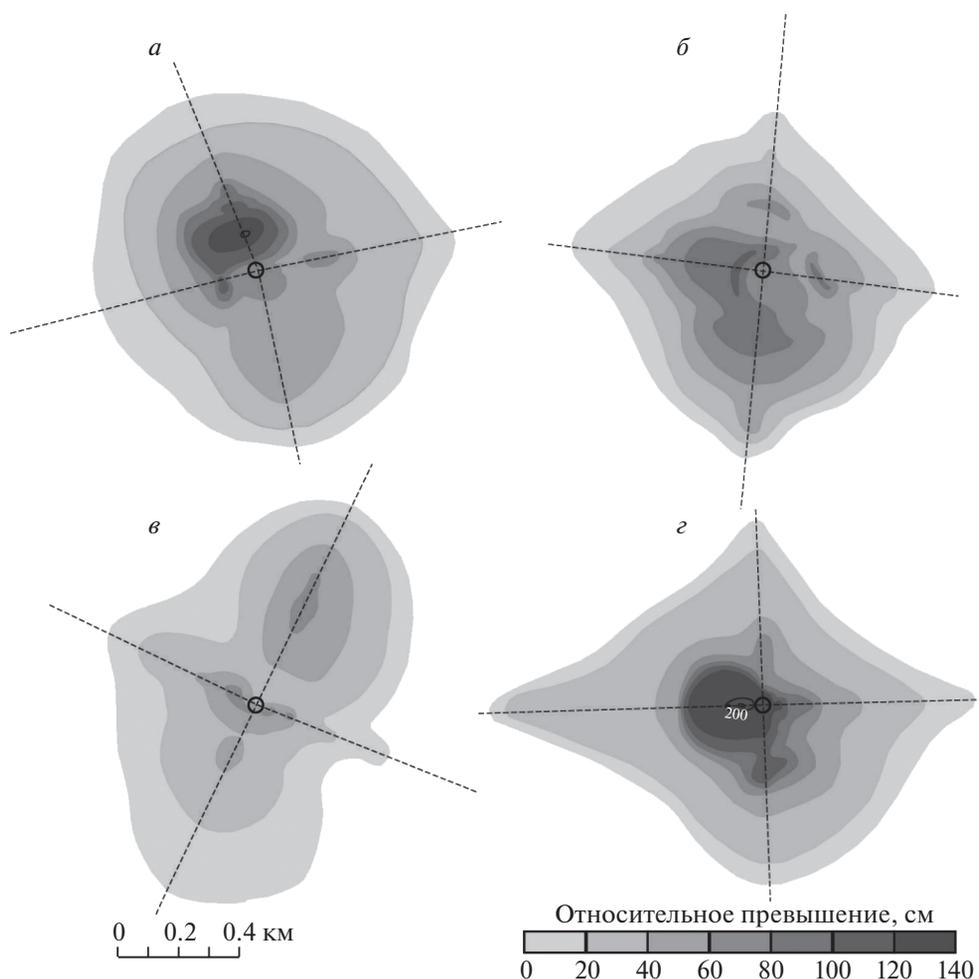


Рис. 4. Изменения относительных отметок дневной поверхности в плане на участках: а – 2, б – 1, в – 3, г – 6.

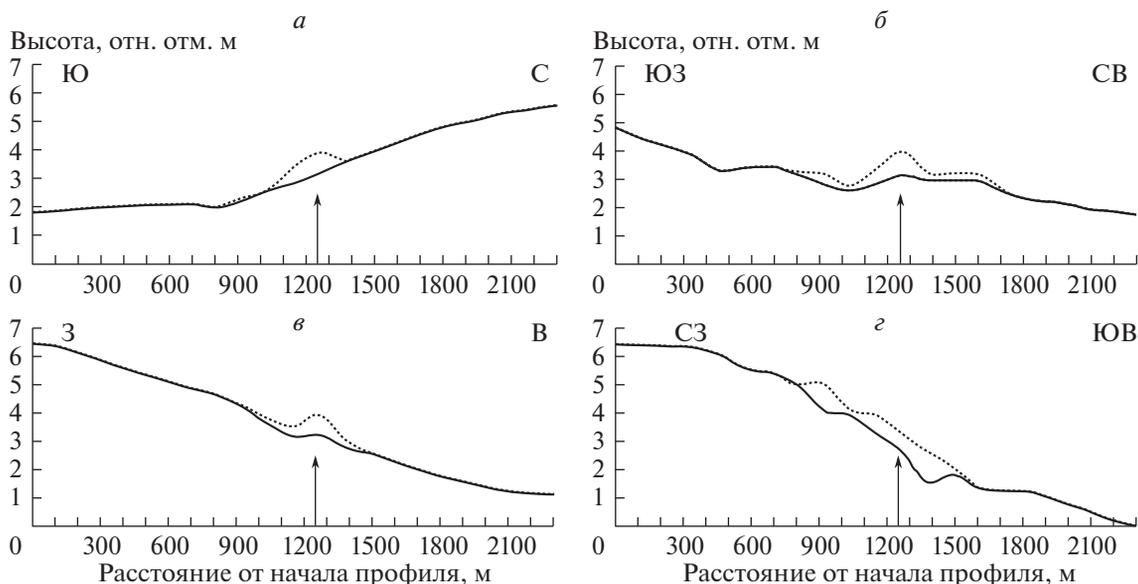
Изменения относительных отметок дневной поверхности, установленные вдоль профиля с небольшим уклоном до 0.002 в пределах относительно ровной дневной поверхности, могут быть отнесены к *косейсмическим* (первичным), обусловленным проведением ПЯВ и прохождением сейсмических волн. Формирование поствзрывных деформаций, выделенных вдоль профилей с уклоном более 0.002, может быть связано с постсейсмическими (вторичными) гравитационными процессами (обвальными-осыпными, склоновыми и др.).

Зарегистрированные изменения относительных отметок дневной поверхности не всегда соответствуют остаточным деформациям грунта (необратимым) при взрыве по нескольким причинам. Во-первых, на приустьевых участках скважин выполнено геодезическое нивелирование вдоль профилей, а не площадная топосъемка. Во-вторых, изменения относительных отметок дневной поверхности могут быть осложнены за счет гравитационных процессов, получающих

преимущественное распространение вдоль склонов с уклонами более 0.002.

На участках 1 и 2, расположенных у южного окончания мезозойского грабена (см. рис. 1 и 2), области максимального изменения относительных отметок дневной поверхности с амплитудами 1.5 и 1 м смещены на северо-запад и запад на расстояния 90 и 120 м относительно эпицентров взрывов (рис. 4а, б) и согласуются с уклоном современного рельефа. Радиус поствзрывных деформаций поверхности с амплитудой >0.2 м при взрывах на участках 1 и 2 не превысил 0.6 км относительно эпицентра взрыва.

На участке 3, расположенном в пределах отложений майтюбинской свиты среднего-верхнего карбона (см. рис. 1 и 2), поствзрывные деформации дневной поверхности преимущественно зафиксированы на расстоянии до 0.7 км от эпицентра ПЯВ в северо-восточном направлении в соответствии с ее уклоном. Максимальные изменения относительных отметок дневной поверхности до 0.7 м установлены по простиранию пород на расстоянии до 120 м от эпицентра взрыва (рис. 4в).



**Рис. 5.** Изменения относительных отметок дневной поверхности вдоль профилей, пройденных на участке 4 (здесь и на рис. 6 профиль до проведения взрыва обозначен сплошной линией, пунктиром — после; место проведения крупномасштабного взрыва в скважине показано стрелкой).

Область поствзрывных деформаций дневной поверхности на участке 6 после взрыва в туфопесчаниках буконьской свиты среднего карбона преимущественно ориентирована в западном направлении на расстояние до 0.9 км от эпицентра взрыва. Наибольшие изменения отмечены западнее эпицентра взрыва на расстоянии до 70 м с амплитудой 2.2 м и южнее — на расстоянии 0.2 км с амплитудой до 1.1 м (рис. 4з).

На северо-востоке площадки Балапан поствзрывные деформации дневной поверхности рассмотрены на примере участков 4, 7, 11 и 17, расположенных в области распространения кокпектинской свиты нижнего карбона (см. рис. 1, 2). Участки 4 и 11 находятся на склоне аллювиально-пролювиальной равнины, плавно переходящей в I надпойменную террасу и пойму р. Чаган. Естественный уклон дневной поверхности в эпицентральной зоне по профилям, ориентированным вдоль аллювиально-пролювиальной равнины, не превышает 0.001 на северо-восток. По профилям, направленным на запад и юго-запад к пойме р. Чаган, возрастает до 0.003.

Область поствзрывных деформаций дневной поверхности на участке 4 расположена вдоль и вверх по склону на расстоянии до 0.2 км от эпицентра взрыва, вниз по склону — до 0.3 км. Максимальное увеличение относительных отметок дневной поверхности на 0.8 и 1.1 м зарегистрированы на удалении 60 и 170 м от эпицентра взрыва вдоль и вниз по склону соответственно (рис. 5).

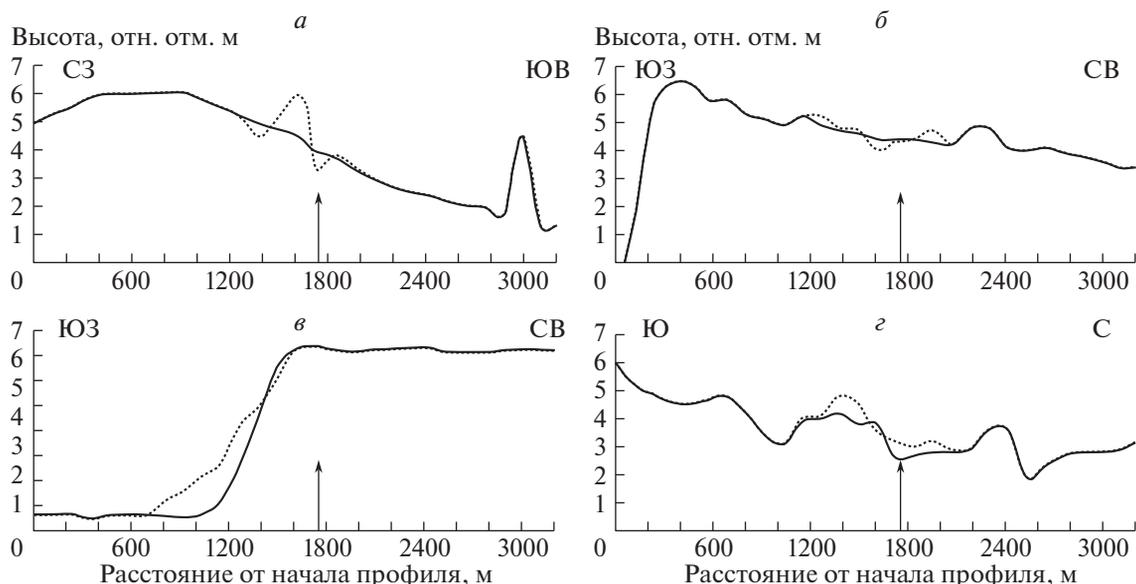
Техногенные микроформы рельефа на участках 7, 11 и 17 подтверждены либо увеличением относительных отметок дневной поверхности на

0.7–1.9 м, либо их снижением на 0.2–0.6 м при уклоне поверхности до 0.002. Например, максимальный подъем дневной поверхности на 1.4 м смещен на 60 м от эпицентра взрыва в скважине 7 и сопровождается симметричными понижениями на 0.5–0.6 м на расстояниях 60 и 170 м (рис. 6а). По остальным профилям установлено относительно равномерное поднятие дневной поверхности после взрыва.

На юге и юго-западе площадки Балапан в пределах вулканогенно-осадочных и метаморфизованных отложений турнейской свиты нижнего карбона расположено большинство участков с остаточными деформациями грунта, сформированными при проведении взрывов с высокими значениями магнитуд 6.0–6.1 (см. табл. 1, рис. 2). На приустьевых участках боевых скважин 8 и 12, вдоль профилей с уклоном до 0.002 отмечено преимущественно уменьшение относительных отметок дневной поверхности до 0.8 м, которое смещено на расстояние до 60 м относительно эпицентров взрывов и частично оконтурено подъемом на “крыльях” с амплитудой до 0.4 м (рис. 6б).

Максимальные уменьшения относительных отметок дневной поверхности до 1.1–1.3 м зарегистрированы по профилям, ориентированным вниз по склонам при проведении взрывов на участках 8, 9, 16. Относительно высокие амплитуды изменений относительных отметок дневной поверхности связаны с “сработкой” склона гравитационными процессами (рис. 6в, г).

Наибольшие поствзрывные деформации дневной поверхности отмечены в пределах участков,



**Рис. 6.** Изменение относительных отметок дневной поверхности вдоль профилей, пройденных на участках в юго-западной части площадки Балапан (*а* – техногенная микроформа рельефа на юго-востоке участка 7 сформирована ранее проведенным взрывом с нештатной радиационной ситуацией [12]; *б* – поствзрывные деформации дневной поверхности на участке 12 в пределах полого наклоненной на северо-восток равнины; *в* – вторичные гравитационные изменения: осыпь у подножия склона и “срез” склона на участке 8; *г* – косейсмический (первичный) подъем пород южнее эпицентра взрыва на участке 18 и “смешанный” тип севернее эпицентра взрыва).

характеризующихся вариациями ее уклонов от 0.002 до 0.009. Например, максимальное увеличение относительных отметок, зарегистрированное на участке 8, у подножия склона, составило 3.2 м (рис. 6в), образовалось в результате обвальнo-осыпных процессов. Тогда как, на участке 18 максимальное увеличение относительных отметок дневной поверхности на 0.7–1 м на выположенном склоне на расстоянии 170 м южнее и юго-западнее эпицентра взрыва отнесено к косейсмическому (первичному) (рис. 6г).

На участке 10 при взрыве в боевой скважине, пройденной на всю глубину в плагиогранитах с дайками порфиринов, область наибольшего подъема дневной поверхности до 4.6 м зарегистрирована восточнее эпицентра взрыва на расстоянии до 170 м над ложбиной стока. Область развития поствзрывных деформаций дневной поверхности прослежена на расстоянии от 0.4 до 0.8 км от эпицентра взрыва. Общий подъем дневной поверхности от 2.4 до 2.6 м установлен на расстоянии до 0.6 км в субширотном направлении. Западнее эпицентра взрыва на расстоянии 170 м в пределах относительно ровного участка с уклоном до 0.002 отмечен подъем поверхности на 3.1 м.

При низких значениях скорости распространения продольных волн на уровне гипоцентра взрыва 4.6–4.9 км/с [2] и магнитуды взрыва 5.3–5.7 (см. табл. 1) поствзрывные деформации дневной поверхности не выявлены на участках 5, 14 и 15.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменения относительных отметок дневной поверхности установлены как в плане, так и по профилям на каждом участке с учетом существующих уклонов. Образование *косейсмических* (первичных) форм – бугров пучений и провальных понижений сопряжено с моментом взрыва и прохождением сейсмических волн. Значения изменений относительных отметок дневной поверхности, зафиксированные в техногенных (косейсмических) микроформах рельефа, могут быть соотнесены с массовой скоростью смещения пород.

Образование *постсейсмических* микроформ обусловлено природно-техногенными процессами, связанными с последующей стабилизацией массива после крупномасштабного техногенного воздействия. Асимметричность области проявления поствзрывных деформаций дневной поверхности на участках проведения взрывов зависит от современного рельефа (см. рис. 4–6).

В пределах зоны интенсивно деформированной дневной поверхности максимальные изменения относительных отметок установлены у подошвы склонов, в ложбинах, расположенных на более низких гипсометрических отметках. Подобные техногенные увеличения относительных отметок поверхности имеют смешанный тип, так как могут быть связаны не только с взбросом пород, но и их смещением по склону, заполнением понижений рельефа (см. рис. 6в, г).

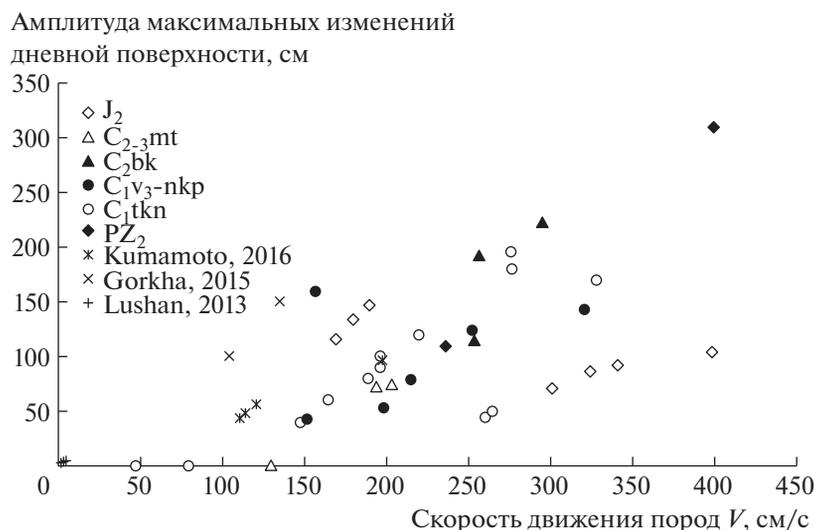


Рис. 7. Зависимость между амплитудой максимальных изменений дневной поверхности и скоростью движения пород при взрывах и землетрясениях.

Напротив, установленное увеличение относительных отметок поверхности в эпицентральной зоне по профилям с уклонами до 0.002 соотносятся с рассчитанными значениями массовой скорости движения пород (см. рис. 5, 6б).

На относительно ровных участках профилей протяженность зон поствзрывных деформаций дневной поверхности не превышает 0.8 км. На склонах межсочных понижений и в направлении к долине р. Чаган деформации поверхности распространены на расстояния от 0.9 до 1.4 км. Уменьшение относительных отметок дневной поверхности до 1.3 м на участках проведения крупномасштабных взрывов по профилям, пройденным по внешней бровке террасы, может быть связано со “срезом” склона и последующими обвально-осыпными процессами (см. рис. 6в, г).

На основе проведенного анализа определены изменения относительных отметок дневной поверхности, отнесенные к косейсмическому (первичному) типу деформаций, для которых на соответствующих приведенных расстояниях могут быть рассчитаны массовые скорости движения пород [6]. Полученные значения использованы для построения диаграммы, представленной на рис. 7.

Диапазон изменений относительных отметок дневной поверхности при ПЯВ может быть связан не только с неполной информацией из-за неравномерности распределения расходящихся профилей на приустьевой площадке скважины, но и обусловлен локальными геолого-структурными условиями. Например, пониженные значения подъема дневной поверхности от 0.4 до 1 м при массовых скоростях движений грунта от 260 до 400 см/с зарегистрированы на участках 1, 12 и

13. Последствия взрыва в скважине, пройденной в алевропелитах углистых, на участке 12 проявились “классически” — в эпицентральной зоне сформирована провальная воронка овальной формы с максимальным снижением дневной поверхности до 0.8 м, по бортам воронки относительно эпицентра взрыва образовались бугры вспучивания высотой до 0.4 м (см. рис. 6б).

Небольшой подъем дневной поверхности до 0.5 м при расчетной массовой скорости движения пород 260 см/с зарегистрирован на участке 13, в пределах которого преимущественно распространены сланцы, перекрытые с поверхности только слоем песка мощностью 15 м. Следует отметить, что по опубликованным результатам газовой съемки, проведенной в 2010 г. на приустьевой площадке этой скважины размером  $0.5 \times 0.5$  км, выявлены участки повышенных концентраций метана [9]. Установленная газификация на приустьевой площадке косвенно подтверждает нарушение задерживающей (сплосности покрова) и указывает на отсутствие надежной изоляции (герметичности) вдоль ствола скважины [10].

В пределах участка 1 на приустьевой площадке боевой скважины, пройденной в осадочно-терригенных отложениях юры, сформировалась инверсионная структура. По данным геодезического нивелирования, проведенного после взрыва, установлен подъем поверхности на 1 м при расчетной массовой скорости движения пород 400 см/с. Согласно данным [11], через 20 лет после взрыва в районе эпицентра взрыва на участке 1 образовалась провальная воронка диаметром 200 м, глубиной до 30 м.

Повышенные изменения относительных отметок дневной поверхности зарегистрированы

при проведении взрывов в туфах и туфопесчаниках по сравнению с данными, полученными при проведении топогеодезических работ на участках, сложенных песчаниками с прослоями сланцев углелистых. Максимальный подъем дневной поверхности на 3.1 м установлен на участке 10 при взрыве в скважине, пройденной в гранитном массиве.

Подобные *сейсмодислокации* – нарушения дневной поверхности, сопровождаются сильными землетрясениями с магнитудой  $M_s 6.8$  и более [8]. К косейсмическим (первичным) дислокациям отнесены системы сейсморазрывов различной протяженности и кинематики и сопряженные с ними валы вспучивания, эскарпы с амплитудами вертикальных смещений от 0.2 до 2 м и более. Постсейсмические (вторичные) дислокации представлены преимущественно сейсмогравитационными формами: оползнями, осыпями, проседаниями, реже – разжижением пород с образованием грязевых грифонов.

Данные по поствзрывным деформациям дневной поверхности от взрывов (см. обозначения  $J_2$ ,  $C_{2-3}mt$ ,  $C_2bk$ ,  $C_1v_3-nkr$ ,  $C_1tkn$ ,  $Pz_2$ ) на рис. 7 дополнены сведениями из опубликованных источников по сейсмодислокациям, связанным с землетрясениями с глубиной очага 10–15 км.

Минимальные значения косейсмических изменений относительных отметок дневной поверхности и скорости движения пород определены при землетрясении Lushan, China, произошедшем 20.04.2013 г. с магнитудой  $M_s 7.1$ , по данным GPS-станций [16]. При таких же значениях расчетных массовых скоростей движения пород изменения относительных отметок дневной поверхности на участках СИП, расположенных в осадочно-метаморфизованных отложениях (конгломератах, песчаниках, алевропелитах), по данным геодезического нивелирования не установлены.

Землетрясение Kumamoto, произошедшее 16.04.2016 г. с магнитудой  $M_w 7.1$  на острове Кюсю (Япония), сопровождалось 40-километровым разрывом дневной поверхности вдоль разрывной зоны Hinagu-Futagawa [15]. В ходе полевых работ зарегистрированы сейсмодислокации на разных расстояниях от эпицентра землетрясения, которое характеризовалось преобладающим механизмом сдвига по простиранию разрывной зоны Hinagu-Futagawa. С одним из сильных афтершоков с  $M_w 5.7$ , последовавшим через 20 мин после основного толчка, имевшего обычный разрывной механизм, связано образование грабена. Амплитуды сейсмодислокаций при землетрясении Kumamoto составили от 0.4 до 1 м при расчетных значениях скорости движения пород от 110 до 200 см/с. Они сопоставимы с поствзрывными деформациями дневной поверхности от крупномасштабных

взрывов при том же диапазоне скоростей (см. рис. 7).

При катастрофическом землетрясении Gorkha в Непале 25.04.2015 г. с магнитудой  $M_w 7.8$ , амплитуды сейсмодислокаций составили 1.0–1.5 м по данным GPS-станций, расположенным на расстоянии 68 и 81 км при скорости смещения пород 100–140 см/с [14]. Эти данные не противоречат значениям амплитуд вертикальных сбросов [15], установленным в ближней зоне землетрясения Kumamoto.

Сопоставимость зарегистрированных изменений относительных отметок дневной поверхности при ПЯВ и амплитуд сейсмодислокаций от землетрясений указывает на подобие типов техногенной и природной остаточной деформации грунтов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выделены основные закономерности техногенных изменений рельефа на СИП:

- максимальные изменения относительных отметок дневной поверхности смещены на расстояние до 0.2 км относительно эпицентров взрывов характеризуются преимущественно асимметричной формой и согласуются с существующим уклоном современного рельефа и анизотропией свойств вмещающих пород;

- среди техногенных микроформ рельефа наибольший подъем дневной поверхности зарегистрирован на участке распространения интрузивных образований, максимальное снижение – на участке, сложенном осадочно-метаморфизованными отложениями – сланцами;

- определены минимальные значения массовой скорости движения пород (до 130 см/с), при которых по результатам геодезического нивелирования не зафиксированы поствзрывные деформации дневной поверхности при ПЯВ; высокоточные данные GPS-наблюдений при землетрясениях указывают на наличие слабовыраженных косейсмических (первичных) смещений с амплитудами до первых сантиметров в данном диапазоне параметров [16];

- поствзрывные деформации дневной поверхности, зарегистрированные при ПЯВ, и сейсмодислокации от землетрясений свидетельствуют о сопоставимости техногенной и природной остаточной деформации грунтов.

Актуализация экспериментальных данных, полученных при проведении ПЯВ, может иметь прикладное значение при изучении сейсмодислокаций, сформированных после землетрясений.

Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по госбюджетной теме № г р. АААА-А17-117112350020-9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Горбунова Э.М., Феррапонтова Е.Н. Гидрогеологические эффекты подземных ядерных взрывов // Доклады Академии наук. 1993. Т. 332. № 3. С. 372–374.
2. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б. Линейный тренд пробега продольной сейсмической волны // Вестник НЯЦ РК. 2014. Вып. 2. С. 81–94.
3. Беляшова Н.Н., Русинова Л.А., Беляшов А.В., Смирнов А.А. Изучение влияния ядерных взрывов на окружающие горные породы и морфологию поверхности с целью разработки инспекции на местах // Вестник НЯЦ РК. 2000. Вып. 2. С. 105–110.
4. Горбунова Э.М. Особенности деформирования массива горных пород при воздействии взрывом (на примере участка Заречье Семипалатинского испытательного полигона) // Вестник НЯЦ РК. 2003. Вып. 2. С. 113–122.
5. Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011. № 12. С. 50–62.
6. Механическое действие ядерного взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 384 с.
7. Пашкин Е.М., Каган А.А., Кривоногова Н.Ф. Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии. М.: КДУ. 2011. 952 с.
8. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В. Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // Физика Земли. 2008. № 6. С. 31–51.
9. Романенко В.В., Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Чернова Л.В. Исследование характера газоносности на площадке “Балапан” // Актуальные вопросы радиологии Казахстана // Сб. тр. НЯЦ РК за 2010 г. Т. 2. Вып. 3. Павлодар: Дом печати, 2011. С. 275–294.
10. Романенко В.В., Субботин С.Б., Чернова Л.В. Исследование протекания процессов газификации в местах проведения ПЯВ // Вестник НЯЦ РК. 2013. Вып. 4. С. 43–50.
11. Фролов З.Н., Ларина Т.Г., Дроздов А.В. Изучение техногенных изменений комплексом геофизических методов в месте проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) на примере боевой скважины 1207 // Вестник НЯЦ РК. 2008. Вып. 3. С. 45–50.
12. Шайторов В.Н., Жолтыбаев А.К., Кислый Б.И. Разработка геолого-геофизических моделей блоков, вмещающих подземные ядерные взрывы (ПЯВ), для оценки и прогнозирования их геоэкологического состояния // Вестник НЯЦ РК. 2008. Вып. 3. С. 26–31.
13. Яковенко А.М., Богатырев А.О. К проведению геодезического мониторинга для изучения деформации дневной поверхности на СИП // Вестник НЯЦ РК. Вып. 4. 2013. С. 102–105.
14. Galetzka J., Melgar D., Genrich J.F. et al. Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal // Science. 4 September 2015. V. 349. Iss. 6252. P. 1091–1095.
15. Lin A., Satsukawa T., Wang M., Asl Z.M., Fueta R., Nakajima F. Coseismic rupturing stopped by Aso volcano during the 2016  $M_w7.1$  Kumamoto earthquake, Japan // Science. 18 November 2016. V. 354. Iss. 6314. P. 869–874.
16. Zhou H. Coseismic displacement estimate of the 2013  $M_s7.0$  Lushan, China earthquake based on the simulation of near-fault displacement field // Earth. Sci. 2016. V. 29. № 6. P. 327–335. doi 10.1007/s11589-016-0169-9

## STUDY OF POST-EXPLOSION SURFACE DEFORMATIONS

E. M. Gorbunova<sup>a, #</sup><sup>a</sup>*Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr. 38, str. 1, Moscow, 119334 Russia*<sup>#</sup>*E-mail: emgorbunova@bk.ru*

Post-explosion surface deformations were investigated at the certain objects in the Balapan area of the Semipalatinsk test site after the fieldwork that consisted in the profile geomorphological survey and geodesic leveling. The surface man-made zoning was considered as an implicit imagery of the massif state change. Mass ground velocities were chosen as the indicator for the comparison of the relative heights changes as a result of the underground explosions and earthquakes. The obtained values of the displacement and the mass ground velocity during explosions were compared with the published data on earthquakes.

**Key words:** *post-explosion surface change, relative heights, seismic dislocations, mass velocity, ground deformation, geodesic data*

## REFERENCES

1. Aduskin, V.V., Spivak, A.A., Gorbunova, E.M., Ferrapontova, E.N. Hydrogeological effects of the underground nuclear explosions. *Doklady Akademii nauk*, [REMOVED HYPERLINK FIELD] 1993, vol. 332, no 3, pp. 372–374. (in Russian)
2. An, V.A., Godunova, L.D., Kaazik, P.B. Linear trend of P-wave travel time. *Vestnik NYaTs RK*, 2014, issue 2, pp. 81–94. (in Russian)
3. Belyashova, N.N., Rusinova, L.A., Belyashov, A.V., Smirnov, A.A. Study of the effect of nuclear tests on the surrounding rock and surface morphology for the pur-

- poses of the on-site inspection. *Vestnik NYaTs RK*, 2000, issue 2, pp. 105–110. (in Russian)
4. Gorbunova, E.M. Peculiarity of rock massif deformation under explosion impact (by the example of Zarechie area of the Semipalatinsk Test Site. *Vestnik NYaTs RK*, 2003, issue 2, pp. 113–122. (in Russian)
  5. Kocharyan, G.G., Vinogradov, E.A., Gorbunova, E.M., Markov, V.K., Markov, D.V., Pernik, L.M. Hydrological response of underground reservoirs to seismic vibrations. *Fizika Zemli*, 2011, vol.47, no. 12, pp. 1071–1082. (in Russian)
  6. *Mekhanicheskoe deistvie yadernogo vzryva* [Mechanical action of a nuclear explosion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 384 p. (in Russian)
  7. Pashkin, E.M., Kagan, A.A., Krivonogova, N.F. *Terminologicheskii slovar'-spravochnik po inzhenernoi geologii* [Terminological dictionary-reference in engineering geology]. Moscow, KDU Publishers, 2011, 952 p. (in Russian)
  8. Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Marakhanov, A.V. The strongest earthquakes in the south of the Mountainous Altai in Holocene. *Fizika Zemli*, 2008, no. 6, pp. 31–51. (in Russian)
  9. Romanenko, V.V., Subbotin, S.B., Lukashenko, S.N., Chernova, L.V. *Issledovanie kharaktera gazonosnosti na ploshchadke "Balapan"* [Investigation of the nature of gas-bearing capacity at "Balapan" site]. *Aktual'nye voprosy radiologii Kazakhstana* [Actual problems of radiology in Kazakhstan]. *Vestnik NYaTs RK*, 2011, vol. 2, issue 3, pp. 275–294. (in Russian)
  10. Romanenko, V.V., Subbotin, S.B., Chernova, L.V. Gasification process on UNE sites, *Vestnik NYaTs RK*, 2013, issue 4, pp. 43–50. (in Russian).
  11. Frolov, Z.N., Larina, T.G., Drozdov, A.V. Investigation of technogenic changes at underground nuclear explosions (UNE) locations by a set of geophysical methods with the example of emplacement borehole 1207. *Vestnik NYaTs RK*, 2008, issue 3, pp. 45–50. (in Russian).
  12. Shaitorov, V.N., Zholdybayev, A.K., Kislyi, B.I. Development of geological-geophysical models of blocks accommodating underground nuclear explosions (UNE) to assess and predict their geocological condition. *Vestnik NYaTs RK*, 2008, issue 3, pp. 26–31. (in Russian).
  13. Yakovenko, A.M., Bogatyrev, A.O. Inspection for geodetic monitoring to study deformation of the daylight surface in the STS. *Vestnik NYaTs RK*, 2013, issue 4, 2013, pp. 102–105. (in Russian).
  14. Galetzka, J., Melgar, D., Genrich, J.F. et al. Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. *Science*, 2015, vol. 349, issue 6252, pp. 1091–1095.
  15. Lin, A., Satsukawa, T., Wang, M., Asl, Z.M., Fueta, R., Nakajima, F. Coseismic rupturing stopped by Aso volcano during the 2016  $M_w$ 7.1 Kumamoto earthquake, Japan. *Science*, 2016, vol. 354, issue 6314, pp. 869–874.
  16. Zhou, H. Coseismic displacement estimate of the 2013  $M_s$ 7.0 Lushan, China earthquake based on the simulation of near-fault displacement field. *Earth Sci.*, 2016, vol. 29, no. 6, pp. 327–335. DOI 10.1007/s11589-016-0169-9.