

УДК 551.2/3

## ОПЫТ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПО ДАННЫМ О СМЕЩЕНИЯХ СКАЛЬНЫХ ОТДЕЛЬНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ АЛАЙСКОЙ ДОЛИНЫ (КИРГИЗИЯ)

© 2022 г. М. В. Родкин<sup>a, b, \*</sup>, С. Ж. Орунбаев<sup>c, d, e, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,  
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

<sup>b</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки, 1Б, Южно-Сахалинск, 693022 Россия

<sup>c</sup>Американский университет в Центральной Азии, ул. А. Токомбаева, 7/6, Бишкек, 720060 Кыргызская Республика

<sup>d</sup>Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли,  
ул. Т. Фрунзе, 73/2, Бишкек, 720027 Кыргызская Республика

<sup>e</sup>Научно-исследовательский институт Сейсмостойкого строительства КГУСТА,  
ул. Малдыбаева, 34Б, Бишкек, 720000 Кыргызская Республика

\*e-mail: rodkin@mitp.ru

\*\*e-mail: orunbaev\_s@auca.kg

Поступила в редакцию 23.11.2020 г.

После доработки 20.08.2021 г.

Принята к публикации 25.10.2021 г.

Приводятся результаты оценок величин пиковых скоростей смещений грунта (PGV) и долгосрочной сейсмической опасности для ряда участков западной части Алайской долины по данным о предположительно сейсмогенных смещениях скальных отдельностей методом PGVEM, PGV estimation method. Кроме доминирующих поперечных простиранию долины сейсмических импульсов, отвечающих надвиговым деформациям, выявлены и сдвиговые, ориентированные вдоль структур Алайской долины. Наблюдается некоторый рост величин PGV (и балльности) в области повышенной сейсмичности, связанной с эшелонированным Главным Памирским надвигом. В целом, квантили  $Q_{0.8}$  и  $Q_{0.95}$  полученных оценок PGV отвечают  $I = 9.5$ , что на пол-балла превышает оценку сейсмической интенсивности на карте ОСР Киргизии от 2018 г. Полученные результаты дают основание предположить перспективность применения PGVEM метода для уточнения карт ОСР на основе оценок PGV от древних сильных событий.

**Ключевые слова:** сейсмическая опасность, метод PGVEM, граница Памира и Тянь-Шаня, сейсмогенные смещения скальных блоков, палеосейсмогеология

**DOI:** 10.31857/S0203030622010060

### ВВЕДЕНИЕ

Оценки сейсмической опасности, представляемые в виде карт ОСР, рассчитываются на основе инструментальных наблюдений и исторических данных (при наличии таковых). Однако период повторяемости сильнейших событий почти заведомо существенно превышает длительность сейсмологических наблюдений, а в большинстве случаев и период регистрации исторических землетрясений. Отсюда актуально использование при построении карт ОСР палеосейсмических данных, характеризующих сейсмичность за более длительные интервалы времени [McCalpin, 1990; Никонов, 1995, 2003; Мак-Калпин, 2011 и др.]. Однако классические методы палеосейсмологии связаны со вскрытием зон разломов и оценкой амплитуд и времен подвижек по этим разломам,

они весьма трудоемки и потому не могут быть реализованы достаточно массово. Чаще они проводятся уже после неожиданно произошедшего сильного землетрясения. Типичным примером является разрушительное Нефтегорское землетрясение (28 мая 1995 г.,  $M = 7.1$ ), район которого полагался слабосейсмичным, и только проведенные затем палеосейсмологические исследования показали, что такие разрушительные землетрясения регулярно происходили в этом районе и ранее [Рогожин, 1996].

Ввиду вышесказанного, представляет интерес использование также и менее трудоемких методов, пусть и не столь точных. Один из таких методов основан на оценке пиковых скоростей смещения грунта (величин PGV) при сильных исторических и палеоземлетрясениях (PGV estimation

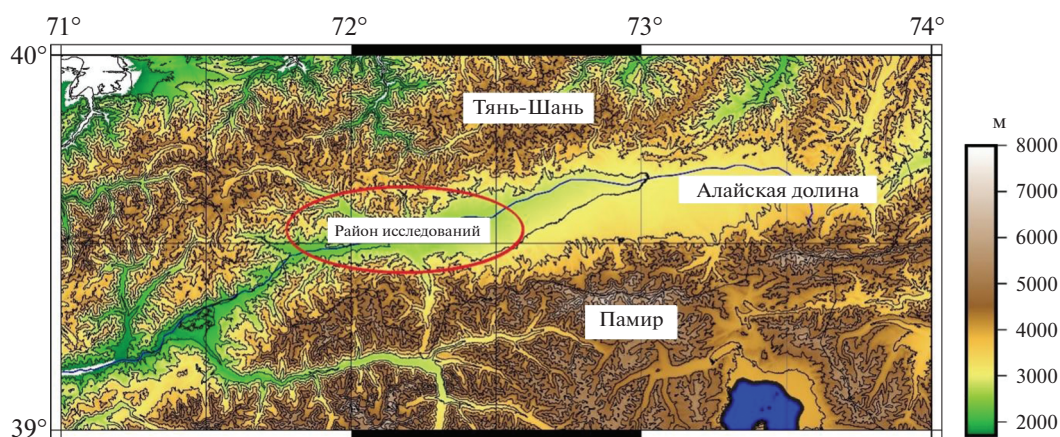


Рис. 1. Район исследования.

method, PGVEM) [Родкин и др., 2012]. В работах [Родкин и др., 2012, 2015; Rodkin, Korzhenkov, 2019] метод PGVEM был успешно верифицирован сравнением с данными по смещениям скальных отделистостей в очаговых зонах нескольких недавних сильных землетрясений и при взрывах. К настоящему времени PGVEM получил уже заметное распространение как один из методов макросейсмических исследований [Никонов и др., 2014; Николаева и др., 2016, 2018; Корженков и др., 2016, 2019; Шварев, Родкин, 2017; Gladkov et al., 2016; Shvarev et al., 2018; Nikolaeva et al., 2021 и др.].

Получаемые методом PGVEM оценки величин PGV (желательно с оценкой соответствующего интервала времени) позволяют далее перейти к площадной оценке ожидаемой балльности (интенсивности) для данного интервала времени. При этом представляется предпочтительным от величин максимальных значений PGV и интенсивности перейти к использованию значений ожидаемой интенсивности  $I$  для некоторого масштаба времени  $T$ , с некоторой вероятностью  $q$ , как это, собственно, и представлено на последних картах ОСР. Ситуация здесь аналогично проблеме оценки магнитуды максимально возможного землетрясения; в серии работ [Писаренко, Родкин, 2009; Pisarenko, Rodkin, 2010; Писаренко и др., 2021] аргументируется переход от использования параметра  $M_{\max}$  для неограниченного интервала времени к величинам квантилей  $Q_T(q)$ , не превышения значения  $M_{\max}(T)$  в следующий интервал времени с вероятностью  $q$ .

Заметим, что переход от оценок величин PGV к интенсивности  $I$  облегчается тем, что, согласно [Аптикаев, 2012; Эртелева, 2020], искомые величины интенсивности (балльности) более тесной корреляционной связью связаны со значениями PGV, чем с величинами ускорений PGA.

Ниже обсуждаются результаты применения метода PGVEM для уточнения оценки долговре-

менной сейсмической опасности на ряде участков западной части сейсмически активной Алайской долине, являющейся границей Памира и Тянь-Шаня (рис. 1). По геологическим, геодезическим данным и по результатам расчетов скорости сеймотектонических деформаций вся область Тянь-Шаня и Памира характеризуется высокими значениями современных деформаций [Никонов, 1980; Никонов, Ваков, 1983; Сычева и др., 2008, 2009; Кучай, Бушенкова, 2009; Костюк и др., 2010; Tunini et al., 2017; Сычева, 2017; Rebetsky et al., 2018 и др.]. Доминируют субмеридиональные деформации сжатия, но также развиты и сдвиговые деформации, а локально фиксируются и деформации растяжения. Максимальные скорости сеймотектонических деформаций, достигающие,  $STD \sim 9 \times 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ , наблюдаются на границе Тянь-Шаня с Памиром. Эти деформации концентрируются в областях эшелонированных систем надвигов, расположенных по бортам Алайской долины и отвечающих надвигам на долину горных сооружений Памира и Тянь-Шаня. Более активной является система Главного Памирского надвига, ограничивающая Алайскую долину с юга. Наиболее сильные ( $M_w 7+$ ) инструментально зарегистрированные землетрясения данной области (10 июля 1949 г.,  $M_w 7.5$ , 39.19 N, 70.8 E) и ( $M_w 7.1$ , 11 августа 1974 г., 39.36 N, 73.82 E) произошли на соседних с рассматриваемым участком, западном и восточном, сегментах Главного Памирского надвига. Проведение в такой активной области работ методом PGVEM имеет как методическое, так и прикладное значение, в плане уточнения долговременной сейсмической опасности данной, достаточно плотно заселенной и сейсмоопасной территории.

## МЕТОДИКА

Метод PGVEM нацелен на выявление и анализ сейсмогенных смещений скальных отдельностей. На первом этапе проводится отбраковка иных возможных воздействий, в частности, не рассматриваются смещения, которые могут быть объяснены воздействием гравитации. Еще одним фильтром является диапазон величин смещений; малые смещения могут вызываться также и иными причинами (например, мерзлотным растрескиванием). Редко встречающиеся аномально большие смещения (более 5 м) также не рассматриваются как возможно не сейсмогенные и часто сильно неоднозначные в интерпретации. Набор используемых простых механических (кинематических) моделей (заведомо не полный) дан в описании метода PGVEM [Родкин и др., 2012].

При анализе возможно сейсмогенных смещений в методе PGVEM используется ряд допущений, являющихся обобщением сейсмологических данных. Во-первых, степенной характер распределения величин сейсмических воздействий позволяет рассматривать как доминирующее одно сильнейшее воздействие, полагая другие, существенно более слабые по величине сейсмические воздействия, как бы шумом. Во-вторых, в цуге сейсмических колебаний обычно выделяется одно максимальное отклонение (часто наблюдаются две максимальные последовательные амплитуды колебаний в противоположных направлениях); эти амплитуды и задают максимальное значение массовой скорости – PGV. Предполагается, что эта скорость PGV передается скальному блоку, который затем по инерции перемещается в свое новое положение. Наличие в цуге колебаний единичного, резко выделяющегося значения позволяет пренебречь вкладом других участков цуга сейсмических колебаний, эти последние также играют роль шума. В-третьих, ограничения смещающегося скального блока его окружением также часто служат фильтром, позволяющим реализоваться смещениям только определенной ориентации. Иначе направленные сейсмические воздействия не приводят к смещениям по геометрическим ограничениям. Также полагается, что последующие землетрясения воздействуют уже на свободно лежащий скальный блок и потому оказываются слабее предыдущего, их роль также сводится к росту шума. Перечисленные допущения позволяют в качестве сильно упрощающего приближения рассматривать каждое отдельное смещение скальной отдельности (глыбы) как порожденное как бы единичным сейсмическим воздействием, точнее даже, одним сильнейшим импульсом такого воздействия. В этом приближении можно, по смещению данного скального блока, оценить направление и величину PGV, которые были приложены к скальному блоку, чтобы вы-

звать его смещение. Удовлетворительно надежные результаты величины PGV могут быть получены в результате статистического анализа, позволяющего отбраковать нетипичные смещения, порождаемые несейсмическими воздействиями и выявить основные систематические сейсмогенные компоненты смещений на фоне шума.

В работе [Родкин и др., 2012] для оценки величин PGV в разных случаях предложен набор уравнений баланса механической энергии, упрощенным образом связывающих величину смещения скальной отдельности со значением исходной ее скорости, полагаемой равной PGV. В простейшем (и наиболее часто используемом на практике) модельном случае рассматривается смещение скальной отдельности по горизонтальной поверхности с трением. Уравнение баланса механической энергии в этом случае имеет вид

$$mV^2/2 = mgkL, \quad (1)$$

где  $m$  – масса скальной отдельности;  $V$  – скорость (полагаемая равной PGV);  $g$  – ускорение свободного падения;  $k$  – коэффициент трения;  $L$  – дальность перемещения отдельности. Примеры фотографий такого рода смещений приведены на рис. 2. Обычно смещенный блок и блок основания в той или иной степени перекрыты дерном и погружены в почву. Фотографии аналогичных смещений в других регионах можно посмотреть в работах [Родкин и др., 2012; Шварев, Родкин, 2017; Николаева и др., 2018; Nikolaeva et al., 2021 и др.]

В более сложном случае учитывается величина смещения скальной отдельности по вертикали, а также – в случаях отбрасывания, подбрасывания или переворачивания скального блока – используются иные механические модели. Во всех модельных случаях решается некоторое упрощенное уравнение баланса механической энергии [Родкин и др., 2012]. Применение таких моделей к полевым наблюдениям позволяет получить возможные значения максимальной массовой скорости PGV и азимут смещения.

Смещение каждого отдельного скального блока может порождаться самыми разными причинами, в том числе не связанными с землетрясениями. С искомыми сейсмическими воздействиями ассоциируются типичные значения PGV и азимутов воздействия (если для них не предложено иного объяснения). Ниже, как возможно сейсмогенные, рассматривались смещения скальных отдельностей от нескольких см до первых метров. Причиной меньших смещений может быть растрескивание пород (например, при промерзании), а редкие аномально большие смещения могут быть вызваны иными, не сейсмогенными воздействиями. Указанный диапазон смещений, при пересчете по соотношению (1), отвечает типичным





Рис. 2. Примеры фотографий смещения скальных отдельностей, Алайская долина, 2019.

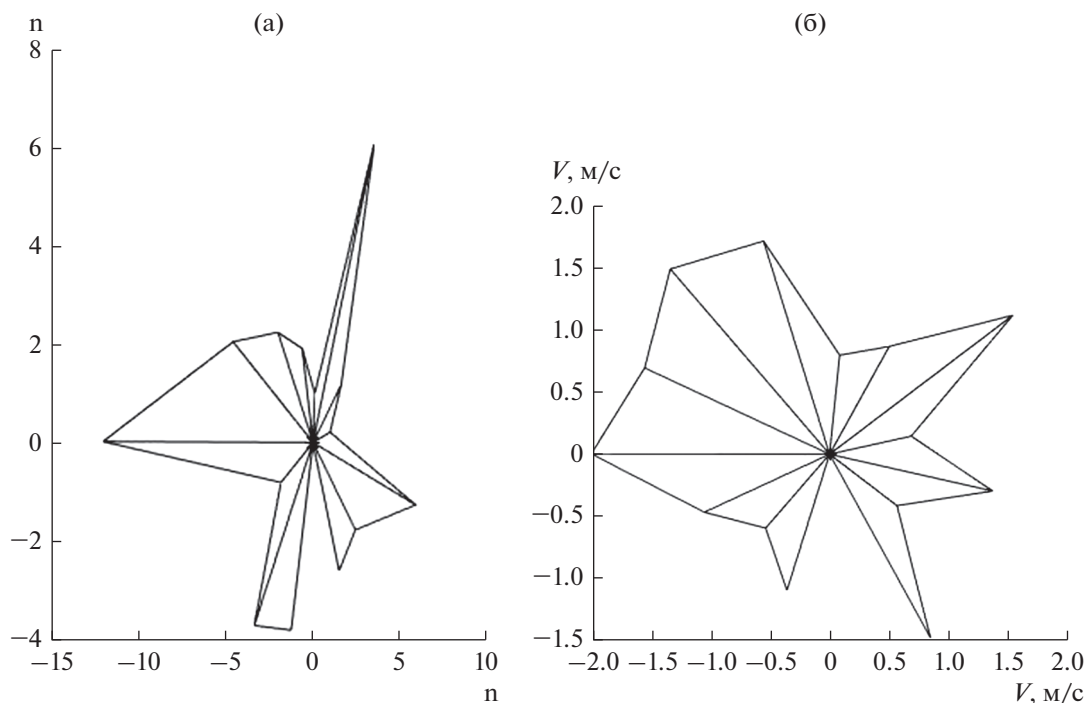
значениям PGV из баз данных сильных движений [Эртелева, 2020]. На последнем этапе происходит определение величин и азимутов сейсмогенных воздействий, как систематически повторяющихся (с естественным разбросом).

Завершая краткое обсуждение PGVEM метода отметим, что этот метод в определенном смысле является аналогом метода дискретно-элементного деформационного анализа (numerical discrete element discontinuous deformation analysis, DDA), разработанного и использовавшегося в работах [Shi, 1993; Kamai, Hatzor, 2008; Yagoda-Biran, Hatzor, 2010; Bao et al., 2013 и др.]. С методической точки зрения, различие методов DDA и PGVEM аналогично различию решения задач механики на основе уравнений движения и на основе соотношений баланса энергии. Первый подход потенциально обеспечивает большую точность, но требует более детальных данных. Второй способ, как правило, проще в реализации. Аналогичное различие имеет место и в данном случае. В работе [Rodkin, Korzhenkov, 2019] на ряде примеров показало, что применение обоих методов (DDA и PGVEM) приводит к практически одинаковым результатам. Мы используем метод PGVEM как более простой в реализации.

В свете вышесказанного ожидаемым вариантом является появление при данном землетрясении двух противоположно ориентированных лепестков розы-диаграммы числа смещений скальных отдельностей. Именно такое распределение было выявлено, например, в очаговой области сильного Кеминского землетрясения (1911 г.,  $M_w = 7.9$ , Северный Тянь-Шань) [Родкин и др., 2015; Rodkin, Korzhenkov, 2019]. Встречаются, од-

нако, и более сложные варианты. На рис. 3, а также по данным работ [Родкин и др., 2015; Rodkin, Korzhenkov, 2019], представлен пример интерпретации данных по смещению скальных отдельностей в очаговой зоне Суусамырского землетрясения (1992 г.,  $M_s = 7.3$ , Киргизия); землетрясение это произошло по двум сопряженным, но разнонаправленным разломам. На рис. 3а представлена роза-диаграмма направлений смещений скальных отдельностей, наблюдаемых в очаговой зоне Суусамырского землетрясения, а на рис. 3б – роза-диаграмма медиан величин PGV в соответствующих азимутах. На рис. 3а видно, что значения азимутов смещений представлены двумя системами противоположно направленных смещений. Такой характер ориентации смещений отвечает сложной структуре очага землетрясения, в которой два вышедших на поверхность сегмента сейсморазрыва имеют взбросо-сдвиговой характер, но приурочены к субширотному Арамсуйскому адырному предгорному разлому на востоке и к Суусамырскому краевому разлому северо-западного простирания – на западе очаговой области. Характерные значения PGV в этих двух доминирующих направлениях составляют 1–2 м/с (см. рис. 3б). Эти значения (также, как и полученные в других случаях) хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями PGV по мировым данным о сильных движениях [Аптикаев, 2012; Эртелева, 2020]. Отметим, что роза-диаграмма для величин скоростей PGV (см. рис. 3б) статистически менее надежна, как в большей степени зависящая от отдельных максимальных значений.





**Рис. 3.** Розы—диаграммы числа событий для направлений смещений (а) и для средних скоростей (б) скальных смещений в данном направлении при Суусамырском землетрясении.

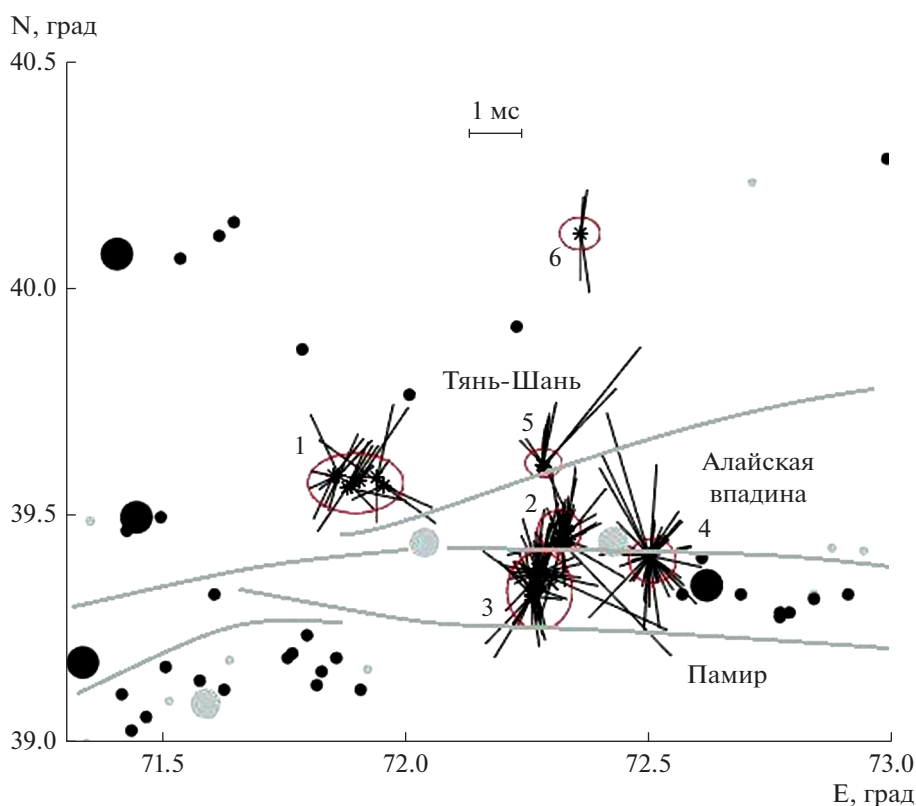
### ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для применения PGVEM метода благоприятны протяженные субгоризонтальные площадки со скальными выходами. Поиск таких площадок и логистика проведения полевых работ привели к тому, что статистически значимые результаты наблюдений оказались сконцентрированными на нескольких пространственно разнесенных площадках, расположенных в разных точках западной части Алайской долины; площадки располагаются на обоих склонах долины.

Всего было наблюденно более 250 случаев, возможно, сейсмогенных смещений скальных отдельностей. Подавляющее большинство из них могут быть описаны простейшей схемой сдвига блока по субгоризонтальной поверхности; эти примеры интерпретировались в соответствии с формулой (1). Из дальнейшего анализа были исключены случаи с неполным описанием, не ясным характером смещений, а также отвечающие горным обвалам, иногда с сильно отброшенными от исходной скальной стенки скальными блоками. Модели перемещения таких блоков должны быть более сложными, с учетом возможного подпрыгивания и перекачивания блоков; использование столь сложных моделей на данном этапе не представляется оправданным. Для полноты картины заметим, что иногда наблюдаемые в этих случаях anomalно большие смещения скальных

блоков представляются согласующимися с anomalно высокими скоростями и дальностью перемещения при некоторых больших горных обвалах и оползнях [Strom, Abdrakhmatov, 2018]; большие смещения могут объясняться также перекачиванием блоков; модели описания таких больших смещений на данный момент остаются неясными. Также отбраковывались случаи единичных наблюдений на существенно разнесенных площадках.

В результате отбраковки перечисленных трудно интерпретируемых случаев осталось 234 примера смещений, которые далее и анализировались. В подавляющем большинстве таких случаев интерпретация проводилась на основе соотношения (1), где было принято значение коэффициента трения  $k = 0.7$ . На рис. 4 даны локализация случаев отобранных наблюдений смещений скальных отдельностей и величины и азимуты соответствующих PGV. Там же показаны эпицентры землетрясений, всех представленных в каталоге и для случая  $M_w \geq 6.0$ . Серыми точками даны данные по каталогу ISC-GEM (1922–1975), черными — по каталогу GCMT (1976–2020). Район исследования довольно плотно заселен, и ощутимые землетрясения ( $M_w \geq 6.0$ ) отражены в каталоге ISC-GEM достаточно полно. Области концентрации эпицентров хорошо обрисовывают эшелонированную систему разломов Основного Памирского



**Рис. 4.** Звездочки и отрезки – расположение, величина и направления импульсов скоростей PGV. Кружками и цифрами обозначены компактные группы смещений скальных блоков. Маленькие точки – все землетрясения, крупные –  $M_w \geq 6.0$ , серые – ISC-GEM каталог (1922–1975), черные – GCMT (1976–2020). Линиями схематично показаны основные разломы эшелонированных систем надвигов Памира и Тянь-Шаня.

надвига и (менее определенно) аналогичных ему ограничивающих Тянь-Шань разломов по северному борту Алайской долины.

Средние значения скоростей и разброс составили  $PGV = 1.0 \pm 0.5$  м/с. В распределении направлений подвижек (импульсов PGV) видны четкие преимущественные направления как на отдельных участках, так и в целом по всему району исследований. Если грубо разделить направления подвижки на субширотное и субмеридиональное, то ко второму относится около 70% случаев, что согласуется с широким развитием в области исследования современных деформаций тектонических сжатия, ориентированных поперек простирания Алайской долины [Сычева и др., 2008, 2009; Костюк и др., 2010; Rebetsky et al., 2018]. В широтных азимутах, в грубом приближении вдоль Алайской долины, ориентирована примерно четверть наблюдаемых случаев подвижек. Естественно предположить, что они соответствуют сдвиговым движениям вдоль доминирующей в данной области субширотной системы разломов.

Овалами и цифрами (1–6) на рис. 4 указаны компактные группы наблюдений величин смещений. Статистический анализ удалось сделать для

групп № 1–4. Для группы 5 нельзя построить розы-диаграммы, а группа 6 включает только несколько наблюдений. Участки 1, 5 и 2–4 отвечают склонам Тянь-Шаня и Памира соответственно. В окрестности участков № 1 и 3 расположены каменные обвалы, на которых были проведены измерения размеров лишайников для оценки возраста нарушений лихенометрическим методом; эти результаты обсуждаются ниже.

Первая, самая западная группа, включает 34 случая смещений, имеет средние координаты 71.9 E, 39.58 N и среднюю высоту точек наблюдения над уровнем моря  $H = 2770 \pm 76$ . Учитывая наличие отдельных событий, с резко выделяющимися величинами смещений (и PGV), будем характеризовать группы не средним значением  $V_{max}$  и не максимальным значением, а более робастными порядковыми характеристиками – медианой  $Q_{50}$  и квантилями 80% и 95%,  $Q_{80}$   $Q_{95}$ . Получаем  $Q_{50} = 0.9$ ,  $Q_{80} = 1.4$  м/с и  $Q_{95} = 1.7$  м/с. Роза-диаграмма направлений и величин PGV для первого участка представлены на рис. 5а, б. Можно видеть, что часть розы-диаграммы рис. 5б построена по малому числу наблюдений, соответствующие медианы в юго-восточных азимутах имеют большую

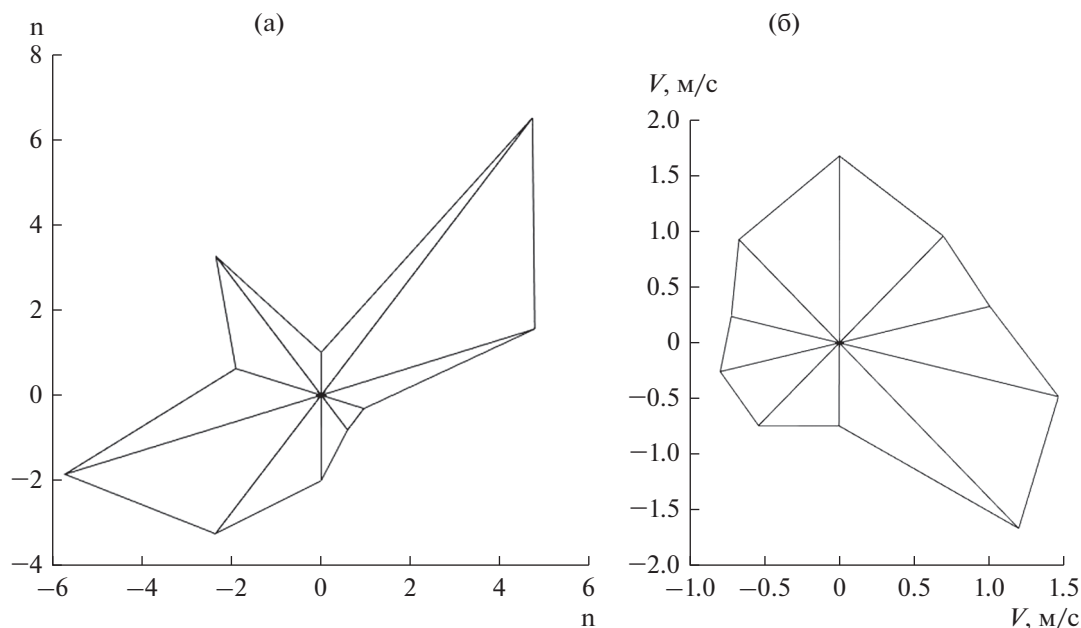


Рис. 5. Роза-диаграмма числа направлений (азимутов) векторов смещений PGV (а) и медиан значений PGV (б) для первой группы точек наблюдения.

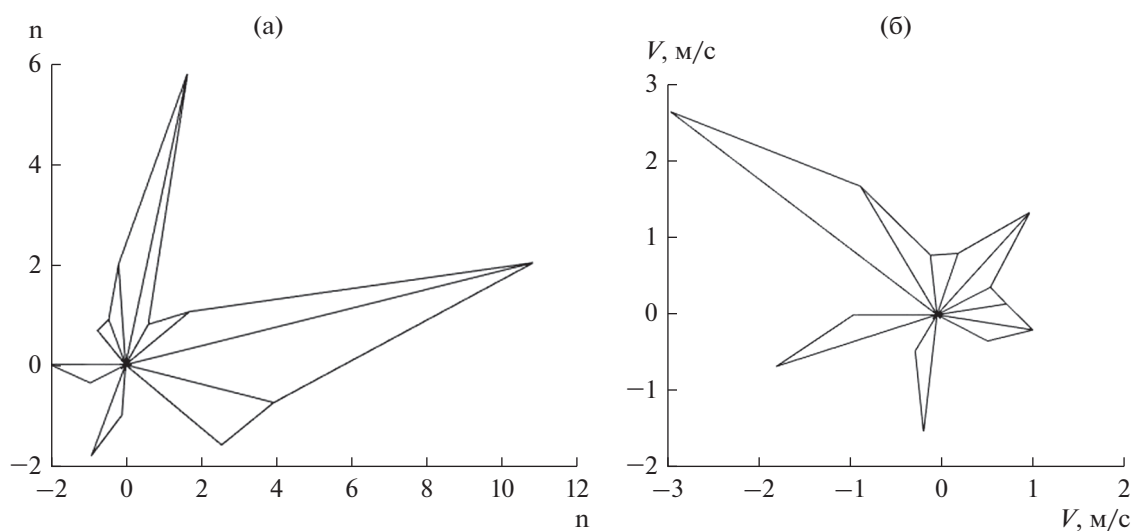


Рис. 6. Роза-диаграмма числа направлений (азимутов) векторов смещений PGV (а) и медиан значений PGV (б) для второй группы точек наблюдения.

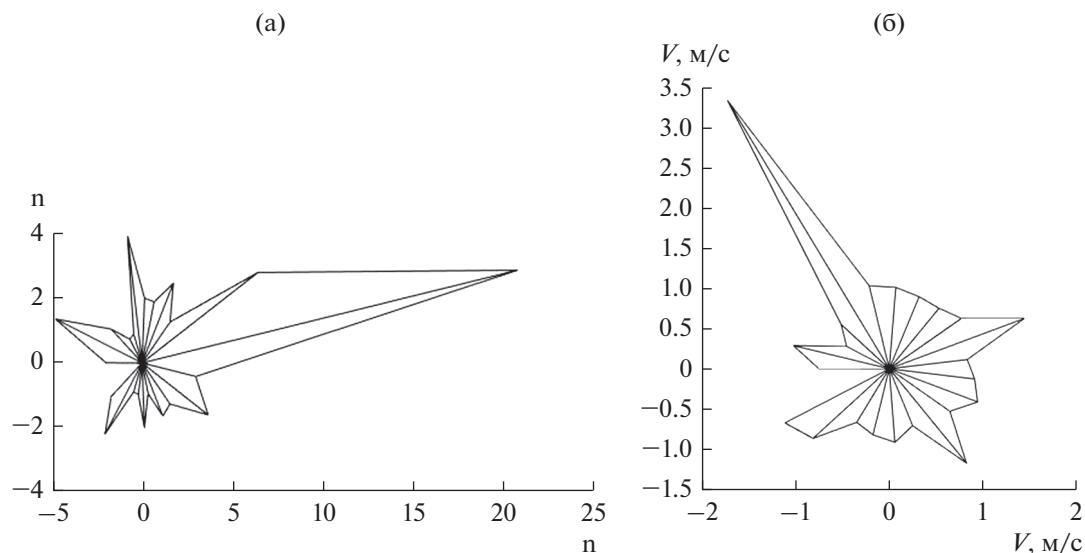
погрешность. При этом величины PGV в этих азимутах максимальны. Предположительно такая ситуация может отвечать более позднему и относительно слабейшему сейсмическому воздействию с северо-восточной ориентацией импульса, и более древнему (с меньшим числом сохранившихся случаев подвижек и менее выраженным лепестком розы-диаграммы для числа событий), но более сильному воздействию юго-восточной ориентации.

Вторая группа включает 38 событий; ее средние координаты 72.32 E, 39.45 N при средней вы-

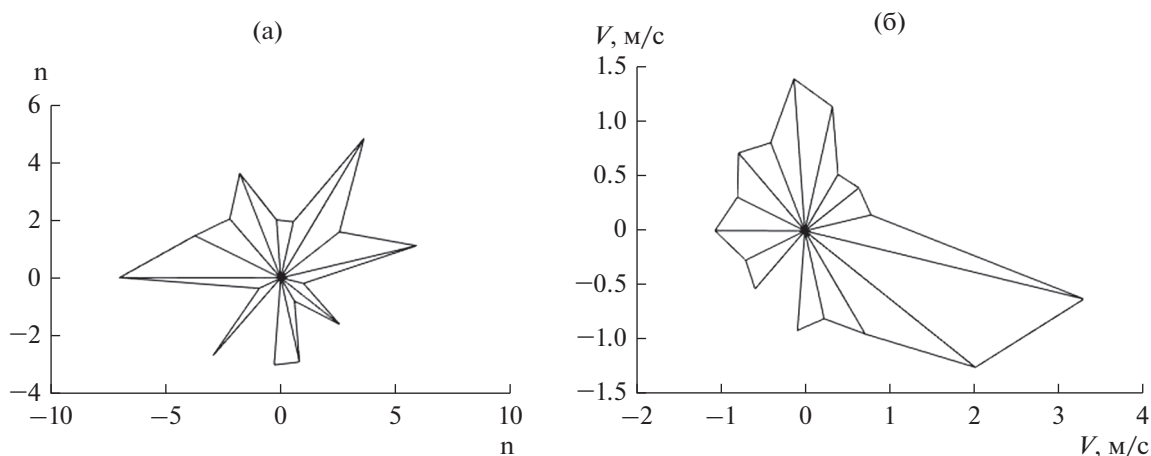
соте точек смещения  $H = 2975 \pm 120$  м над уровнем моря. Характерные значения PGV составляют  $Q_{50} = 0.8$ ,  $Q_{80} = 1.2$  м/с и  $Q_{95} = 1.9$  м/с. Роза-диаграмма значений PGV для этого участка представлена на рис. 6. Также, как и в первом случае, достаточно четко выделяются преимущественные направления смещений, в данном случае субширотного и субмеридионального простиранья.

Третья самая многочисленная группа представлена несколькими соседними участками,





**Рис. 7.** Роза–диаграмма числа направлений (азимуты) векторов смещений PGV (а) и медиан значений PGV (б) для третьей группы точек наблюдения.



**Рис. 8.** Роза–диаграмма числа направлений (азимуты) векторов смещений PGV (а) и медиан значений PGV (б) для четвертой группы точек наблюдения.

расположенными в долине, стекающей с Памира р. Алтын-Дора. Эта группа включает 73 события; ее средние координаты  $72.27\text{ E}$ ,  $39.35\text{ N}$ ,  $H = 3076 \pm 70\text{ м}$ . Характерные значения скоростей PGV равны  $Q_{50} = 0.9$ ,  $Q_{80} = 1.4\text{ м/с}$  и  $Q_{95} = 1.7\text{ м/с}$ . Роза–диаграмма значений PGV для этой группы наблюдений представлена на рис. 7. Предположительно, она может отвечать совокупности трех групп подвижек, одна из которых субперпендикулярна Алайской долине, а две другие ориентированы под острым углом к простираанию долины. При этом максимальные по величине, но относительно немногочисленные импульсы имеют

северо-западную ориентацию, субортогональную простираанию Алайской долины.

Четвертая группа, самая восточная и самая высокогорная, включает 53 события. Ее средние координаты  $72.50\text{ E}$ ,  $39.42\text{ N}$  при высоте  $H = 3450 \pm 29\text{ м}$ . Эта группа отвечает широкой области выполаживания в нескольких километрах выше высокогорного села Ачык-Суу ввиду сползающего с Памира ледника. Роза–диаграмма в этом случае наиболее сложная и, возможно, отвечает совокупности 3–4 противоположно направленных преимущественных ориентаций. Характерные значения скоростей PGV составляют  $Q_{50} = 1.0$ ,  $Q_{80} = 1.3\text{ м/с}$

Таблица 1. Характерные данные по группам

Номер группы	Число смещений	Средняя широта, N	Средняя долгота, E	Высота точек наблюдения, м	PGV, Q <sub>0,5</sub> , м/с	PGV, Q <sub>0,8</sub> , м/с	PGV, Q <sub>0,95</sub> , м/с
1	34	39.58	71.9	2770 ± 76	0.95	1.3	1.7
2	38	39.45	72.32	2975 ± 120	0.8	1.2	1.9
3	73	39.35	72.27	3076 ± 70	0.9	1.4	1.7
4	53	39.42	72.50	3450 ± 29	1.0	1.3	2.2
5	33	39.61	72.28	2910 ± 23	0.8	1.1	1.6
6	4	40.13	72.36	1870	1.0	—	—

и  $Q_{95} = 2.2$  м/с. Роза–диаграмма значений PGV для этого полигона представлена на рис. 8.

Заметим, что для рис. 5–8 характерно, что максимумы розы–диаграммы величин PGV (рисунки “б”) отвечают направлениям с относительно меньшим числом случаев смещения (рисунки “а”). Эту намечающуюся тенденцию можно объяснить тем, что сильнейшие события происходят редко, соответственно, в среднем, они более древние, и образовавшиеся при них случаи смещения скальных блоков успевают по той или иной причине разрушиться.

Для пятой группы точек построить статистически значимые розы диаграммы оказалось невозможным. Средние координаты этой группы 72.28 E, 39.61 N,  $H = 2910 \pm 23$  м. Характерные значения скоростей PGV составляют  $Q_{50} = 0.8$ ,  $Q_{80} = 1.05$  м/с и  $Q_{95} = 1.6$  м/с. Для шестой группы можно указать только средние координаты и медианное значение PGV.

Осредненные характеристики по всем группам приведены в табл. 1.

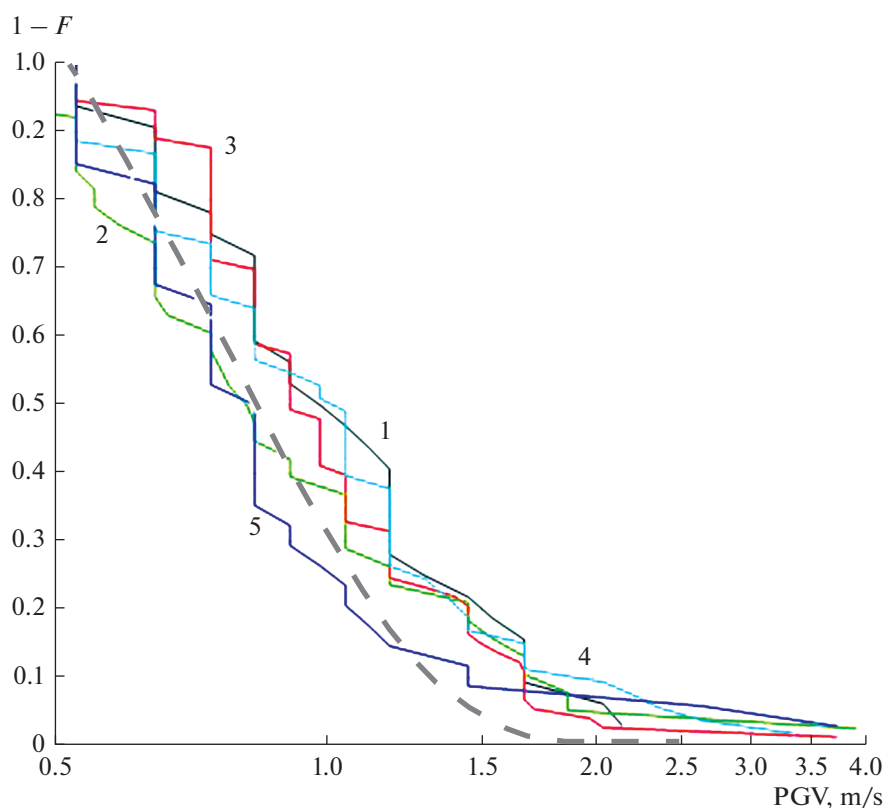
Довольно информативной и устойчивой характеристикой любой величины является ее функция распределения  $F$ , или, более часто используемая в сейсмологии, функция для хвоста распределения  $(1 - F)$ . На рис. 9 представлены эмпирические  $(1 - F)$  распределения для 5 площадок сбора данных. Видно, что эти функции довольно схожи. Заметно отличается от остальных функция  $(1 - F)$  для пятой площадки, с минимальными значениями всех квантилей PGV (см. табл. 1). Для сравнения на том же рисунке приведена модельная функция для нормального распределения со средним значением и разбросом равными 0.5. Видно, что это модельное распределение ведет себя аналогично поведению выборочных распределений в области  $PGV < 0.5$  м/с, но резко отличается от них в области  $PGV > 1.5$  м/с. Отсюда следует, что приведенные эмпирические распределения не могут быть описаны одним нормальным законом, но включают также немно-

гочисленную инородную группу с более высокими значениями PGVs. Такой результат можно рассматривать как независимое указание, что эти распределения порождены не одним, а минимум двумя разными событиями. В пользу этого же вывода выше свидетельствует наличие на розах–диаграммах (см. рис. 5а–8а) нескольких отдельных непересекающихся максимумов (кроме противоположно направленных).

Из сопоставления данных табл. 1 со схемой расположения эпицентров землетрясений и основных разломов (см. рис. 4) можно видеть, что большие значения квантилей отвечают участкам 2, 3 и 4, располагающимся в зоне эшелонированного сейсмоактивного Главного Памирского надвига.

Специальный интерес представляет задача оценки возраста сейсмогенных смещений. В случае получения такой оценки возникает возможность охарактеризовать не только характерные максимальные ожидаемые величины PGV, но и их повторяемость. В качестве дешевой в реализации методики такой оценки иногда используется метод лихенометрии [Beschel, 1957, 1961; Мартин, 1970; Innes, 1985; Галанин, 2002]. Для региона Памира и Тянь–Шаня такие работы описаны в работах [Nikonov, Shebalina, 1979; Никонов, Шебалина, 1986; Smirnova et al., 1990]. Метод лихенометрии основан на относительной стационарности и малости скорости роста размеров лишайников, составляющей обычно не более двух десятков миллиметров за 100 лет, а во многих случаях и намного меньшей. Это обстоятельство, вкуче с продолжительностью жизни лишайников до нескольких тысяч лет, дает возможность оценки минимального возраста скальной поверхности, на которой такие лишайники были обнаружены. Если выявить на данной скальной поверхности наибольший по размерам лишайник и оценить его возраст, то получаем оценку возраста этой скальной поверхности.

Получение датировок методом лихенометрии затрудняют сильные различия в законах роста ли-



**Рис. 9.** Распределения величин PGV на участках 1–5 в сравнении с искусственным примером нормального распределения (со средним значением и разбросом равными 0.5).

шайников в разных условиях и трудность нахождения самого большого по размеру лишайника. Для преодоления второй из этих трудностей часто используется эмпирически выявленное соотношение между диаметром лишайника  $X$ , мм и порядковым номером (1, 2, ...,  $N$ -го) лишайника в порядке убывания размера лишайника для данной совокупности [Галанин, 2002]

$$N = a \log(X) + b, \quad (2)$$

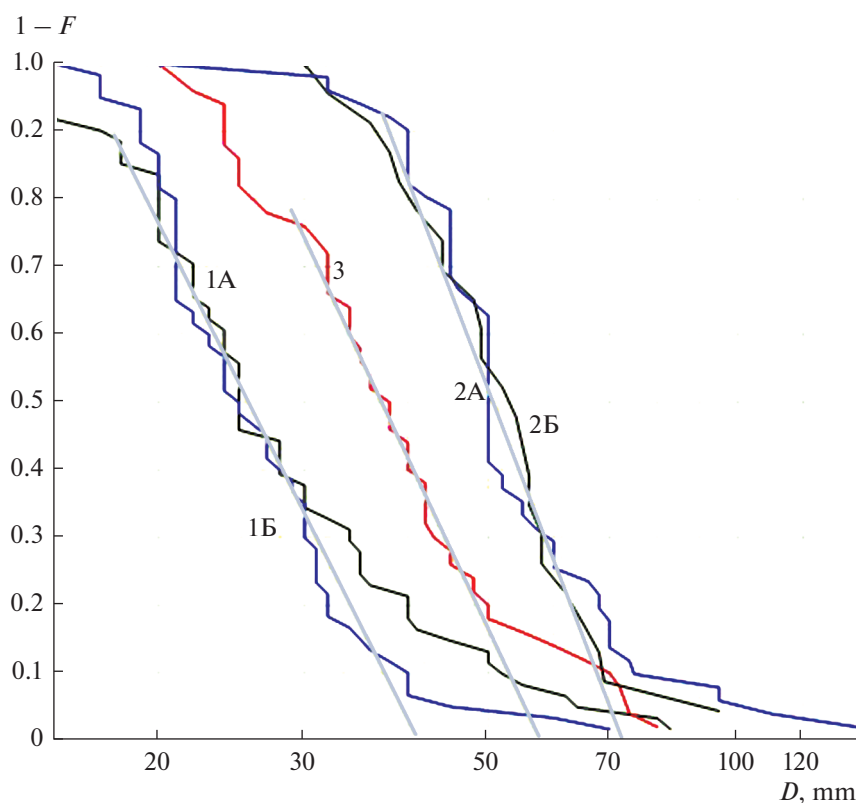
где  $a$  и  $b$  – коэффициенты. Предполагается, что использование соотношение (2) позволяет получать более устойчивую оценку максимального размера лишайника  $X(1)$ , чем в результате использования во многом случайного выборочного максимума. В случае, если в рассматриваемой совокупности встречаются поверхности с разным возрастом образования, можно ожидать более сложного характера зависимости, когда линия типа (2) испытывает излом(ы).

Мы предприняли попытку использования этой методики, несмотря на отсутствие уверенных данных о скорости роста лишайников в средневисотной области склонов Алайской долины. Для этого на скальных обвалах измерялись большие размеры лишайников рода *Rhizocarpon*; мы

полагаем, что это был наиболее распространенный вид *Rhizocarpon geographicum*. Приемлемое (не менее 50) число измерений размеров лишайников было получено нами для 6 наборов данных, 4 из которых (участки 1 и 2, на каждом близкорасположенные обвалы А, Б) расположены в предгорьях Тянь-Шаня, а участок 3 – в долине стекающей с Памира реки Алтын-Дора. Распределения для близкорасположенных обвалов А и Б на участках 1 и 2 близки (рис. 10), что может указывать на одновозрастность основного породившего их события. Локализация одного набора данных утеряна. Средние координаты участков 1 и 2 39.55 N и 72.0 E, третьего участка 39.3 N и 72.25 E.

На рис. 10 разным цветом представлены зависимости типа (2) для разных локализаций отбора размеров лишайников (диаметром более 15 мм). Вид всех полученных эмпирических распределений удовлетворительно отвечает уравнению (2). В рамках предположения о выполнимости соотношения (2) характерные максимальные размеры лишайников  $D_{\max}$  для участков 1, 3 и 2 можно приблизительно оценить как 41, 58 и 73 мм соответственно. Если взять просто максимальные зарегистрированные значения по всем пяти выборкам, то





**Рис. 10.** Эмпирические распределения величин наблюдаемых диаметров лишайников для разных локализаций отбора данных, участки 1 (обвалы А, Б), 2 (обвалы А, Б) и участок 3. Участок 3 – южный борт Алайской долины, долина реки Алтын-Дора. Участки 1 и 2 – скальные обвалы в долинах ручьев северного (Тянь-Шань) борта долины. Серыми толстыми линиями даны аппроксимации по соотношению (2).

имеем значения  $D_{\max} = 70, 80, 80, 95$  и  $140$  мм. Первый метод оценки представляется предпочтительнее. Отметим, что на рис. 10 для всех эмпирических распределений намечается излом в области больших размеров лишайников; как отмечалось выше, такие изломы принято интерпретировать как порождаемые разновозрастными сейсмическими событиями.

Перейти от полученных характерных максимальных размеров лишайников к однозначным оценкам предполагаемого возраста сильных сейсмических событий, однако, не представляется возможным, так как велик разброс предлагавшихся соотношений между максимальным размером лишайников  $D_{\max}$  и возрастом соответствующих поверхностей  $t$ . В работе [Соломина, Савоскул, 1997] для Тянь-Шаня предлагается соотношение  $t = 24.8 + 13.5 D_{\max}$ . Согласно персональному сообщению М.А. Викулиной (Географический факультет МГУ), лишайники на Тянь-Шане растут со скоростью 18 мм за 100 лет, а в книге [Никонов, Шебалина, 1986] принята многопараметрическая и довольно сложная зависимость такой связи. Ввиду такого разнообразия уравнений

связи, датировать рассмотренные случаи не представляется возможным; получаемые по разным формулам оценки возраста сильно различаются. Однако, в плане оценки характерной повторяемости сильных сейсмических событий, это и не столь существенно. Не детализируя возраста вызвавших обвалы конкретных сильных землетрясений, подчеркнем то обстоятельство, что всех наборов данных возраст по любой из упомянутых формул соотношения размера и возраста лишайника, оказывается в диапазоне от примерно 200 лет до 1.5–2 тыс. лет.

В заключении каснемся одного методического вопроса интерпретации данных лихенометрии. На рис. 10 видно, что для всех полученных эмпирических распределений на хвосте распределения, в области больших размеров лишайников, эти размеры существенно превышают значения, ожидаемые при выполнении соотношения (2). Обычно предполагается, что эти отклонения связаны с наложением данных о более древней совокупности лишайников. Но можно предложить и другое объяснение; если предположить, что размеры лишайников описываются нормальным

**Таблица 2.** Характерные значения скоростей, ускорений и финальных смещений грунта при различной сейсмической интенсивности  $I$  (баллы), по [Аптикаев, 2012]

$I$	5	5.5	6.0	6.5	7.0	7.7	8.0	8.5	9.0	9.5
PGV, см/с	1.3	2.2	3.8	6.5	11	19	33	57	98	170
PGA, см/с <sup>2</sup>	17.5	28	44	70	110	175	280	440	700	1100
PGD, см	1.4	3.0	6.6	14	32	70	150	330	720	1600

распределением, то самый хвост этого распределения также будет иметь отклонение в сторону больших размеров лишайников. Мы смоделировали эмпирические распределения на рис. 10 нормальным законом и обнаружили, что в случае нормального закона выраженность отклонения от соотношения (2) оказывается намного меньшей. Отсюда можно заключить, что предположение о наложении минимум двух подмножеств размеров лишайников, от более молодого и от более древнего сейсмического события представляется достаточно обоснованным.

### ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Оценим теперь значения интенсивности, отвечающие полученным значениям PGV. Характерные значения (по данным новой инструментальной шкалы сейсмической интенсивности [Аптикаев, 2012]) величин максимальных значений скоростей, ускорений и величин смещений (PGV, PGA, PGD) в зависимости от балльности приведены в табл. 2. Разброс реально наблюдаемых значений при фиксированной балльности весьма велик. Так, например, для интенсивности  $I = 8.0$  баллов, при типичном значении  $PGV = 33$  см/с, наблюдаемый разброс составляет от 5 до 80 см/с.

Сопоставляя теперь данные табл. 1 и табл. 2 заключаем, что полученные нами по макросейсмическим данным за интервалы времени от нескольких сот до тысячи лет медианы значений PGV отвечают значениям балльности  $I = 9$ ; и такие значения характерны для всех проанализированных участков (см. табл. 1). Именно такая интенсивность (балльность) для этой области и указана на действующей карте ОСР Киргизии [Сычева, 2017; Карта ..., 2018]. Но значения более высоких квантилей  $Q_{0.8}$  и  $Q_{0.95}$ , оказываются выше, при этом они позволяют несколько детализировать величину сейсмической опасности по территории. Базовая оценка сейсмической опасности по квантилям  $Q_{0.8}$  и  $Q_{0.95}$  на интервале времени первых сотен лет оказывается ближе к значению  $I = 9.5$ . При

этом более высокие значения имеют место для участков, расположенных непосредственно в зоне Главного Памирского надвига.

Другая детализация представлений о сейсмической опасности региона связана с тем, что кроме ожидаемых нормальных к простиранию Алайской долины сейсмических импульсов наблюдались и субпараллельные долине. Это может быть связано с тем, что кроме надвигов орогенов Памира и Тянь-Шаня на Алайскую долину реализуются также и сдвиговые субширотные подвижки, ориентированные вдоль долины. Последнее соответствует данными анализа фокальных механизмов землетрясений сетью KNET, согласно которым для наиболее хорошо исследованных впадин Северного Тянь-Шаня – Суусамырской и Кочкорской – на фоне доминирования общего субмеридионального сжатия характерно также развитие сдвиговых сейсмотектонических деформаций [Сычева, 2017].

Сравнение разных параметров смещенных каменных отдельностей выявило также слабую, но статистически значимую тенденцию увеличения значений PGV с ростом размеров смещающейся блоковой отдельности (рис. 11). Коэффициент корреляции не высок,  $r = 0.45$ , но учитывая число точек значимость связи сомнений не вызывает. Если для типичных случаев с характерным размером блока не более 0.5 м характерные скорости смещения составляют  $1.0 \pm 0.5$  м/с, то для намного более редких случаев смещения блоков размером 1 м и более при большом разбросе значения PGVs варьируют от 0.7 до почти 4 м/с. Такая тенденция встречалась нами ранее для случая происшедшего зимой Кеминского землетрясения ( $M_w = 7.9$ , 3 января 1911 г., Киргизия). В работе [Родкин и др., 2015], на основании комплекса данных эта тенденция объясняется тем, что Кеминское землетрясение произошло зимой, и каменные отдельности меньшего размера испытывали относительно большее сопротивление при их смещении в снежном покрове. Если такая интерпретация приложима и в данном случае, то более точно характеризующими возможные максимальные значения PGV следует полагать не типич-

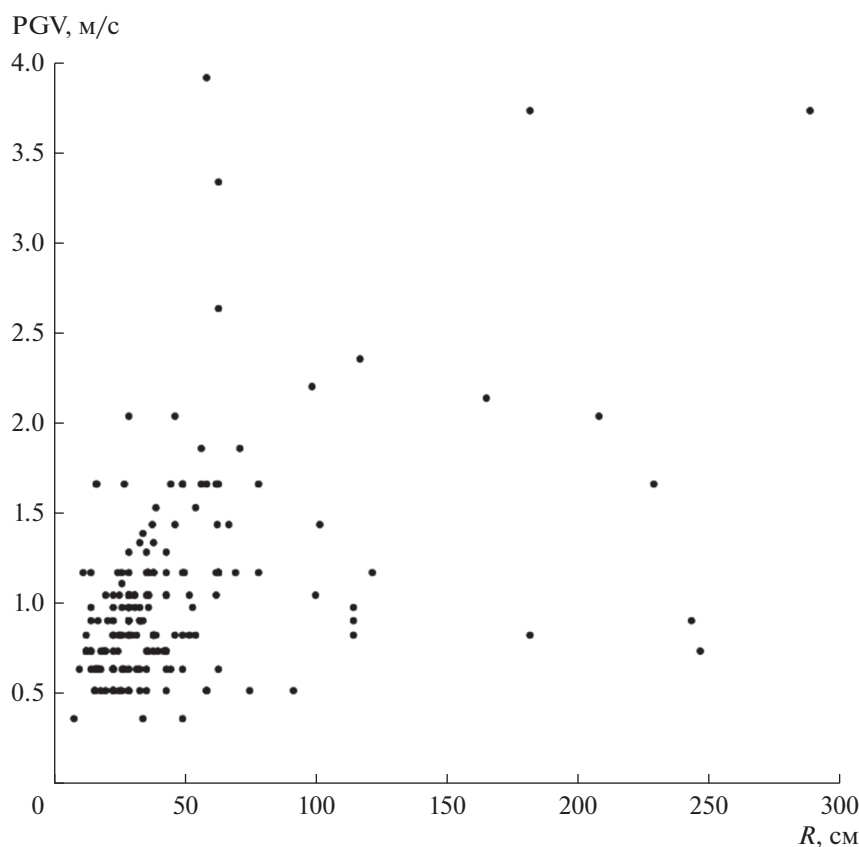


Рис. 11. Связь величин PGV и характерного размера R смещаемых скальных отдельностей.

ные их значения в районе 1 м/с, а более редкие большие значения, 2–3, возможно до 4 м/с (см. рис. 11). В этом случае ожидаемые значения максимальной балльности также окажутся выше, до  $I = 9.5$  и возможно даже до  $I = 10.0$  баллов.

Вопрос, какие именно из полученных оценок PGV – медианные значения или высокие (но статистически обоснованные) квантили – следует использовать для характеристики долгосрочной сейсмической опасности остается открытым и требует дальнейших исследований. Нам представляется, что следует ориентироваться на значения высоких квантилей –  $Q_{0.8}$  и  $Q_{0.95}$ .

## ВЫВОДЫ

Как известно, новые сильные землетрясения, пусть и не часто, возникают также и в областях, ранее полагавшихся слабосейсмичными. В связи с этим карты ОСР приходится систематически пересматривать, что принято объяснять тем, что повторяемость сильнейших событий обычно существенно реже длительности сейсмологических наблюдений и даже длительности рядов данных по исторической сейсмичности. Теоретически,

из статистических соображений, можно ожидать, что наблюдаемая максимальная интенсивность будет иметь тенденцию возрастать с ростом времени регистрации примерно, как логарифм времени регистрации или несколько медленнее [Pisarenko, Rodkin, 2010]. Очевидна задача уточнения карт ОСР на основе использования палеосейсмических данных, характеризующих сейсмичность за интервалы времени в первые тысячи лет и более [Никонов, 1995, 2003; Рогожин, 1996; McCalpin, 2009 и многие др.]. Основной метод палеосейсмологии основывается на вскрытии сейсмогенных разломов с запечатленными в них сейсмическими подвижками канавами; этот метод весьма трудоемкий и затратный по времени и требуемому оборудованию; поэтому он не может быть реализован достаточно массово.

Отсюда представляют интерес использование также иных, менее трудоемких, пусть и менее точных, методов палеосейсмологических исследований. Одним из вариантов такого подхода является метод, основанный на оценке пиковых скоростей смещения грунта (величин PGV) при палеоземлетрясениях (PGV estimation method, PGVEM [Родкин и др., 2012]). Полевые работы в



западной части Алайской долине позволили выявить более 200 случаев предположительно сейсмогенных смещений скальных отдельностей. На основе этих данных оценены типичные и максимальные значения PGV скоростей. Медианы значений PGV, будучи пересчитаны в балльности по новой инструментальной шкале [Аптикаев, 2012], дают значения интенсивности совпадающие с действующей картой ОСР Киргизии,  $I = 9.0$ . Квантили PGV  $Q_{0.8}$  и  $Q_{0.95}$  дают значения сейсмической опасности в районе до полу-балла выше. Максимальные значения PGV в отдельных случаях отвечают превышению принятой балльности до 1.0 балла. В качестве наиболее обоснованных для оценки долгосрочной сейсмической опасности мы полагаем оправданным исходить из оценок интенсивности на основе квантилей  $Q_{0.8}$  и  $Q_{0.95}$ .

В целом можно заключить, что опыт применения PGVEM метода в высокосейсмичном районе сочленения Памира и Тянь-Шаня дал вполне логичные результаты, откуда следует, что этот метод может использоваться в практике оценки величин сейсмической опасности по палеосейсмологическим данным.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны рецензентам за внимательное отношение к работе и большое количество сделанных замечаний, способствовавших существенной переработке и улучшению статьи. Особая благодарность авторов А.А. Никонову и М.А. Викулиной за консультации, в частности, по скорости роста лишайников. В полевых работах принимали участие Р.Э. Шатахьян и Д.С. Орунбаев, которым авторы выражают свою глубокую признательность.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования и проведение полевых работ были частично поддержаны в рамках проекта “Climatic and Tectonic Natural Hazards in Central Asia” (CATENA) и РФФИ, проект № 20-05-00433.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: ИФЗ РАН, 2012. 176 с.
- Галанин А.А. Лихенометрия: современное состояние и направления развития метода. Магадан: СВКНИИ, 2002. 74 с.
- Карта интенсивности сотрясений земной поверхности в баллах при вероятных максимальных землетрясениях на территории Кыргызстана / Составители К.Е. Абдрахматов и др. Бишкек, 2018.
- Корженков А.М., Деев Е.В., Лужанский Д.В., Абдиева С.В., Агатова А.Р., Мажейка Й.В., Меньшиков М.Ю., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Родкин М.В., Сорокин А.А., Фортуну А.Б., Чаримов Т.А., Шен Д., Юдахуу А.С. Сильное средневековое землетрясение в северном Прииссыккулье (Тянь-Шань): результаты палеосейсмологических и археосейсмологических исследований // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 4. С. 68–88.
- Корженков А.М., Абдиева С.В., Гладков А.С., Деев Е.В., Лю Ц., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Родкин М.В., Сорокин А.А., Турова И.В., Фортуну А.Б. Палеосейсмичность вдоль адырных разломов (на примере Кокондыр-Тегерекского разлома в Юго-Западном Прииссыккулье, Тянь-Шань) // Вулканология и сейсмология. 2019. № 5. С. 67–82.
- Костюк А.Д., Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Яги Ю. (Yagi Y.). Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // Физика Земли. 2010. № 3. С. 52–65.
- Кучай О.А., Бушенкова Н.А. Механизмы очагов землетрясений Центральной Азии // Физическая мехомеханика. 2009. № 1. С. 17–24.
- Мартин Ю.А. Лихенометрическая индикация времени обнажения каменистого субстрата // Экология. 1970. № 5. С. 16–24.
- Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Комплексные сейсмологические исследования на ключевом участке в юго-западной части Кольского полуострова (северо-восток Скандинавского щита) // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 2. С. 215–218.
- Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В. Детальные палеосейсмогеологические исследования в бортовой зоне впадины оз. Имандра (Кольский регион): новые подходы и результаты // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 6. С. 866–880. <https://doi.org/10.15372/GiG20180608>
- Никонов А.А. Определение магнитуд и повторяемости сильных землетрясений прошлого по сейсмодислокациям (на примере зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня) // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250. № 3. С. 336–339.
- Никонов А.А. Палеосейсмологический подход при сейсмическом районировании и оценке сейсмической опасности // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2–3. С. 46–62.
- Никонов А.А. Становление и развитие палеосейсмологии в ИФЗ РАН // Очерки геофизических исследований. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 90–100.
- Никонов А.А., Ваков А.В., Веселов И.А. Сейсмотектоника и землетрясения зоны сближения Памира и Тянь-Шаня. М.: Наука, 1983. 240 с.
- Никонов А.А., Шебалина Т.Ю. Лихенометрический метод датирования сейсмодислокаций (методические аспекты и опыт использования в горах юга Средней Азии). М.: Наука, 1986. 185 с.
- Никонов А.А., Шварев С.В., Сим Л.А., Родкин М.В., Бискэ Ю.С., Маринин А.В. Скальные палеосейсмодиформации на Карельском перешейке (ключевой участок “пещеры Иностранцева”, Ленинградская область) // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 5. С. 591–596.
- Палеосейсмология / Ред. Дж.П. Мак-Калпина. М.: Научный мир, 2011. Т. 1. 560 с.; Т. 2. 400 с.

- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Неустойчивость параметра  $M_{\max}$  и альтернатива его применению // Физика Земли. 2009. № 12. С. 48–59.
- Писаренко В.Ф., Любушин А.А., Родкин М.В. Максимальные землетрясения в будущих интервалах времени // Физика Земли. 2021. № 2. С. 27–45.
- Рогожин Е.А. Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника. 1996. № 2. С. 45–53.
- Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика (электронный журн.). 2012. Т. 3. № 3. С. 293–237. [http://gt.crust.irk.ru/article\\_80](http://gt.crust.irk.ru/article_80)
- Родкин М.В., Корженков А.М., Орунбаев С.Ж. Опыт оценки максимальных массовых скоростей в очаговых зонах сильных землетрясений по смещениям скальных отдельностей на примере некоторых районов Киргизии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 4. С. 25–36.
- Соломина О.Н., Савоскул О.С. Ледники западной и северной периферии Тянь-Шаня за 2000 лет // Геоморфология. 1997. № 1. С. 78–86.
- Сычева Н.А. Обновленные оценки интенсивности сейсмотектонических деформаций и весовой функции для расчета СТД Бишкекского геодинамического полигона // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 1. С. 206–211.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Юнга С.Л., Макаров В.И. Сейсмотектонические деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня // Физика Земли. 2008. № 5. С. 3–15.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Костюк А.Д. Интенсивность сейсмотектонических деформаций как показатель динамических процессов в земной коре (на примере Тянь-Шаня) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 37–46.
- Шварев С.В., Родкин М.В. Структурная позиция и параметры палеоземлетрясений в районе горы Воттоваара, средняя Карелия, восточная часть Фенноскандинавского щита // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. № 2. С. 35–60.
- Эртелева О.О. Параметры сейсмических колебаний в эпицентральных областях землетрясений / Дисс. ... доктора физ.-мат. наук. 2020. М.: ИФЗ РАН, 2020. 220 с. [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru).
- Bao H., Yagoda-Biran G., Hatzor Y.H. Site response analysis with two-dimensional numerical discontinuous deformation analysis method // Earthq. Eng. Struct. Dyn. 2013. V. 43. № 1. P. 14–25. <https://doi.org/10.1002/eqe.2340>
- Beschel R.E. A project to use lichens as indicators of climate and time // Arctic. 1957. V. 1. P. 60–71.
- Beschel R.E. Dating rock surfaces by lichen growth and its application to glaciology and physiography (lichenometry) // Geology of the Arctic 2. Toronto: University of Toronto Press, 1961. P. 1044–1062.
- Gladkov A.S., Lobova E.U., Deev E.V., Korzhenkov A.M., Mazeika J.V., Abdieva S.V., Rogozhin E.A., Rodkin M.V., Fortuna A.B., Charimov T.A., Yudakhin A.S. Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in Late Pleistocene lacustrine deposits of Issyk-Kul lake (Kyrgyzstan) // Sedimentary Geology. 2016. V. 344. P. 112–122.
- Innes J.L. Lichenometry // Progress in Physical Geography. 1985. V. 9. № 2. P. 187–254.
- Kamai R., Hatzor Y.H. Numerical analysis of block stone displacements in ancient masonry structures: a new method to estimate historic ground motions // Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2008. № 32. P. 1321–1340.
- Nikolaeva S.N., Rodkin M.V., Shvarev S.V. Late Glacial and postglacial seismicity in the Northeastern Fennoscandian Shield: tectonic position and age of paleo-earthquakes near Murmansk // Advance online publication of the Bulletin of the Geological Society of Finland. 2021. P. 41–60.
- Nikonov A., Shebalina T. Lichenometry and earthquake age determination in central Asia // Nature. 1979. № 280. P. 675–677. <https://doi.org/10.1038/280675a0>
- McCalpin J.P. Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research // International Geophysics. 2009. № 95. P. 1–106.
- Pisarenko V., Rodkin M. Heavy-Tailed Distributions in Disaster Analysis // Advances in Natural and Technological Hazards Research. V. 30. M.: Springer, 2010. P. 167–179 <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9171-0>
- Rebetsky Yu.L., Polec A.Yu., Kuchay O.A., Sycheva N.A. Moment Tensor Solution. The Stress State of Seismic Areas of the Central and East Asia. Moment Tensor Solutions / Ed. D'Amico Sebastiano. M.: Springer, 2018. P. 519–556.
- Rodkin M.V., Korzhenkov A.M. Estimation of maximum mass velocity from macroseismic data: A new method and application to archeoseismological data // Geodesy and Geodynamics. 2019. № 10. P. 321–330.
- Shvarev S.V., Nikonov A.A., Rodkin M.V., Poleshchuk A.V. The active tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: parameters of paleoearthquakes estimated from bedrock and soft sediment deformation features // Advance online publication of the INQUA special issue of the Bulletin of the Geological Society of Finland. 2018. P. 89–105.
- Shi G.-H. Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis // Computational Mechanics Publication, Southampton, UK. 1993.
- Smirnova T.Yu., Nikonov A.A. A Revised Lichenometric Method and Its Application Dating Great Past Earthquakes // Arctic and Alpine Res. 1990. V. 22. № 4. P. 375–88.
- Strom A., Abdrakhmatov K. Rockslides and rock avalanches of Central Asia. M.: Elsevier, 2018. 265 p. <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Tunini L., Jiménez-Munt I., Fernandez M., Vergés J., Bird P. Neotectonic deformation in central Eurasia: A geodynamic model approach // J. Geophysical Res.: Solid Earth. 2017. № 122. P. 245–261. <https://doi.org/10.1002/2017JB014487>
- Yagoda-Biran G., Hatzor Y.H. Constraining paleo PGA values by analysis of overturned columns // Earthq. Eng. Struct. Dyn. 2010. № 39. P. 463–472.

## Experience in Assessing Seismic Hazard on Data on Displacement of Rock Units; an Example of the Alay Valley, Kirgizia

M. V. Rodkin<sup>1, 2, \*</sup> and S. Zh. Orunbaev<sup>3, 4, 5, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences,  
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,  
Nauka str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

<sup>3</sup>*American University of Central Asia, Tokombaeva str., 6/7, Bishkek, 720060 Kyrgyz Republic*

<sup>4</sup>*Central-Asian Institute Applied Geosciences, T. Frunze str., 73/2, Bishkek, 720027 Kyrgyz Republic*

<sup>5</sup>*Scientific-research institute Anti-Seismic Construction, KSUCTA, Maldybaeva str., 34B, Bishkek, 720000 Kyrgyz Republic*

\*e-mail: rodkin@mitp.ru

\*\*e-mail: orunbaev\_s@auca.kg

The results of estimates of the peak velocity values (PGVs) and the long-term seismic hazard for a number of areas in the western part of the Alai Valley based on the examination of presumably seismogenic rock blocks displacements obtained by the PGV estimation method (PGVEM) are presented and discussed. In addition to the dominant seismic impulses corresponding to the thrust deformations, strike-slip deformations oriented along the Alai Valley were identified. An increase in PGV values (and scores) in the area of increased seismicity associated with the echeloned Main Pamir thrust is found. In general, the  $Q_{0,8}$  and  $Q_{0,95}$  quantiles of the obtained PGV estimates correspond to  $I = 9.5$ , which is half a point higher than the seismic intensity estimate on the seismic hazard map of Kyrgyzstan from 2018 year. The results obtained testify that the PGVEM method is promising for refining seismic hazard estimates from ancient strong earthquakes.

*Keywords:* seismic hazard, PGVEM method, Pamir-Tien Shan boundary, seismogenic displacement of rock blocks, paleoseismogeology