

УДК 55(1/9)

С. Бейги¹, И.В. Таловина², Н.С. Крикун³

ОЦЕНКА НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА УРОМИЕ-ДОХТАР (ИРАН) НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА МОРФОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ

В статье проведен анализ морфотектонических индексов, который был разработан в качестве основного инструмента для выявления областей, испытывающих быструю тектоническую деформацию, или оценки относительных изменений тектонической активности в конкретной области. Мы применили этот анализ в зоне разлома Зефре, который расположен у вулканической дуги Уромие-Доhtar (УДВД) в Центральном Иране. Разлом Зефре является одним из самых важных в центральной части УДВД. Он имеет северо-западное простирание от города Натанз на севере до деревни Зефре на юге и длину 130 км. Разлом Зефре сечет и смещает УДВД на всем ее протяжении. Правосторонняя компонента сдвигов была показана на основе анализа линий разломов на картах, интерпретации спутниковых изображений и полевых данных, что подтверждается тектоническими признаками. В данной работе были измерены морфотектонические индексы вдоль зоны разлома Зефре и оценена тектоническая активность региона. Для идентификации и расчета морфотектонических индексов мы использовали топографические и геологические карты, спутниковые снимки и полевые наблюдения. Цифровая модель рельефа (ЦМР) была получена путем векторизации изолиний топографических карт. Для расчета индексов и обнаружения тектонических признаков использовались стандартные методы в программах ArcGIS, Global Mapper и Envi. Рассчитанные коэффициенты извилистости горных фронтов (S_{mf}), отношения ширины дна долины к высоте ее бортов (V_f) и отношения ширины долины к высоте ее бортов (V) потока имеют средние значения 1,17, 0,78 и 6,92 соответственно. Кроме того, индекс градиента длины потока (SL), смещение долин рек, наличие асимметричных и изогнутых пролювиальных вееров и увеличение скорости вертикальной эрозии, наряду с остаточными эффектами движения разломов в четвертичных отложениях, указывают на то, что разлом Зефре активен.

Ключевые слова: тектонические деформации, вулканическая дуга, разлом Зефре, сейсмическая активность, смещение русел рек, пролювиальные веера

Введение. Под термином «неотектоника» понимают движения земной коры в течение неогенового и четвертичного периодов, которые имеют решающее значение в формировании современного рельефа [Обручев, 1948; Апродов, 1965; Трифонов, 2016]. Неотектонические движения обычно пространственно связаны с активными зонами сейсмичности и разломами. Однако, некоторые позднекайнозойские (неотектонические) структуры не вызывают значительную сейсмичность, потому что они либо стали неактивными; либо интервал повторения между землетрясениями длиннее, чем период исторических записей. Чтобы определить местонахождение этих неотектонических разломов, геологи ищут следы их деформации, выраженные в виде тектонических изменений в рельефе [Лотоцкий, 2012].

Морфотектонический анализ основан на сопоставлении морфологических особенностей земной поверхности с ее геологической структурой и составом новейших отложений, проведенном в историко-геологическом (палеогеографическом) аспекте [Ло-

тоцкий, 2012; Burbank, Anderson, 2001]. Иными словами – морфотектонику можно исследовать двумя способами: 1) изучение геоморфологических ландшафтов, созданных тектоническими процессами; 2) изучение тектонических движений по геоморфологическим принципам. Первое определение фокусируется на ландшафтах, а второе определяет тектонические задачи [Keller, Pinter, 1996]. Примерами тектонических форм рельефа являются извилистость горных фронтов, созданная молодыми разломами, смещенные конусы выноса временных водотоков, речные террасы и другие участки измененного вдоль разломов рельефа [Лотоцкий, 2012; Lykov et al., 2017].

Морфографические и морфометрические данные имеют важнейшее значение для качественной и количественной оценки форм рельефа и процессов морфогенеза, которые простейшим образом классифицируют рельеф и ландшафт по размеру, высоте (минимальная и максимальная) и уклону [Симонов, 2005; Лотоцкий, 2012; Keller et al., 2002]. Морфография и морфометрия рельефа необходимы для реше-

¹ Санкт-Петербургский горный университет, геологоразведочный факультет, кафедра исторической и динамической геологии, аспирантка; e-mail: beygi.soheyla@yahoo.com

² Санкт-Петербургский горный университет, геологоразведочный факультет, кафедра исторической и динамической геологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: i.talovina@gmail.com

³ Санкт-Петербургский горный университет, геологоразведочный факультет, кафедра исторической и динамической геологии, аспирант; e-mail: nskrikun@gmail.com

ния многих практических вопросов: при составлении топографических, географических, геологических и геоморфологических карт, при поисках и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и т. д. Численные измерения позволяют геоморфологам объективно сравнивать и оценивать различные ландшафты. В настоящее время взаимодействия, связанные с эволюцией ландшафтов, могут быть теоретически рассчитаны в различных тектонических средах по формулам для каждого индикатора [Whipple, Tucker, 1999; Willgoose et al., 1991]. Например, недавно разработанные цифровые данные, такие как цифровая модель рельефа (ЦМР), позволяют нам быстро анализировать статистические свойства ландшафтов и в соответствии с формулами получать относительную тектоническую активность области.

Целью данного исследования является анализ различных морфотектонических индексов и тектонических признаков для оценки неотектонической активности разлома Зефре. Использование наиболее широко известных морфотектонических индексов в зоне разлома Зефре позволило нам произвести корреляцию активной тектоники вдоль этой основной зоны разлома с эрозионными процессами на обширной территории.

Геология и географическое положение. Район исследования является частью вулканической дуги Уромие-Дохтар (УДВД) и расположен в центральной части провинции Исфахан (рис. 1А, Б). В этой области есть высокие горы, цепи которых тянутся с северо-запада на юго-восток параллельно орогенному поясу Загрос. Литологическое разнообразие, тектоническая активность и многочисленные разломы, а также эрозия горных пород являются важными факторами, влияющими на формирование морфологии региона. На исследуемой территории встречаются породы различных возрастов. Западная часть сложена осадочными отложениями от палеозойского до четвертичного возраста с преобладанием триасовых и меловых пород. Триасовые породы представлены черными сланцами и кварцевыми песчаниками, меловые осадочные породы представлены фораминиферовыми известняками нижнего мела и иноцерамусовыми известняками в переслаивании со сланцами верхнего мела. В восточной части района исследований встречаются магматические комплексы эоцена и миоцена, а также пирокластические породы. Здесь преобладают туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты и нуммулитовые известняки (см. рис. 1Б).

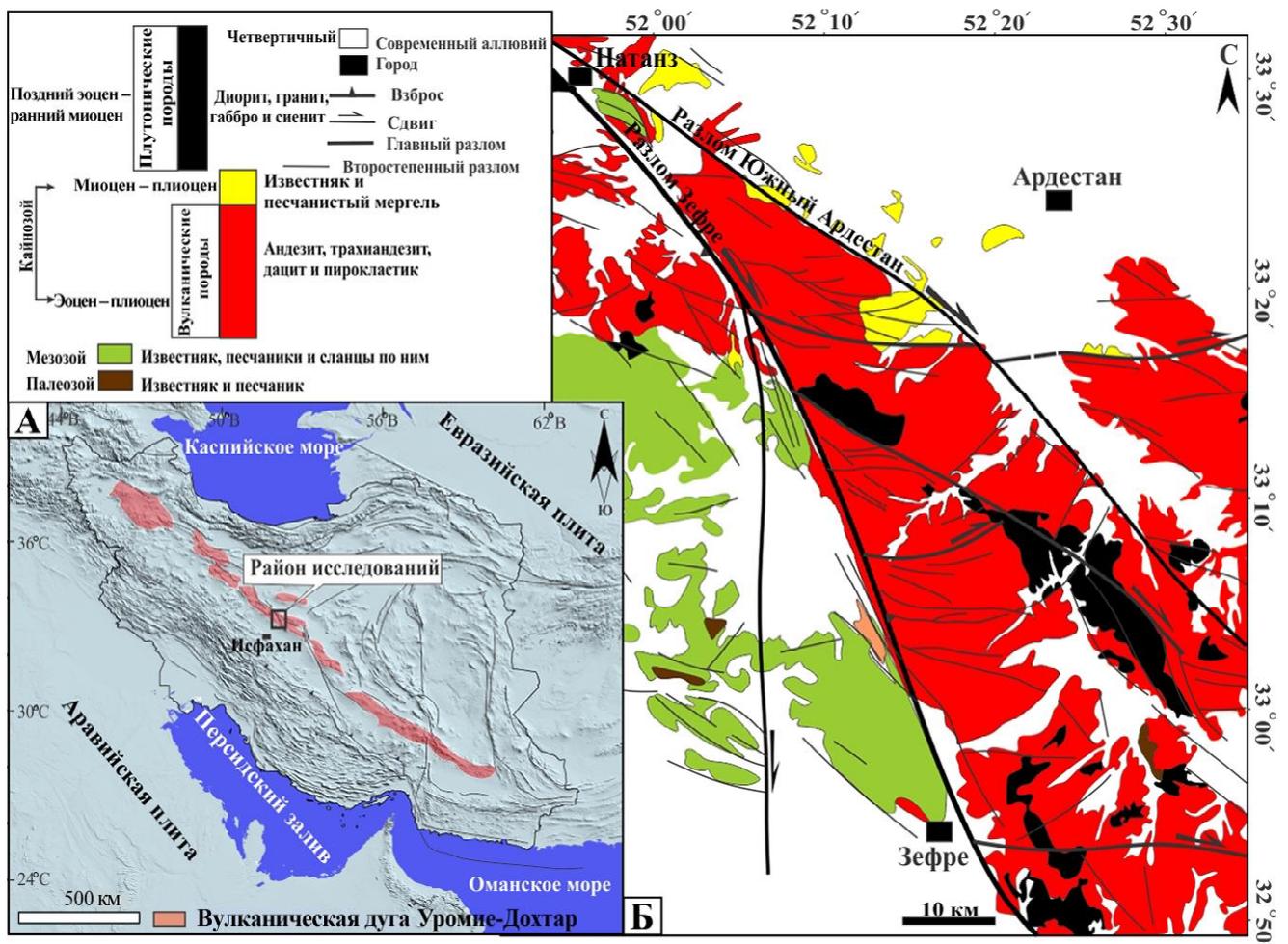


Рис. 1. Местоположение района исследования с геологической картой и схема разломов в районе исследования

Fig. 1. Location of the study area with a geological map and the scheme of faults in the study area

В районе исследований выявлено много разломов и трещин с различными характеристиками. Разлом Зефре – одна из наиболее важных структур в этом регионе – имеет приблизительную длину 130 км. Он начинается от г. Натанз на севере и продолжается к юго-востоку до населенного пункта Зефре. Разлом Зефре имеет северо-западное простирание, он рассекает и смещает УДВД по всей его длине. Правосторонний компонент был выявлен на основе анализа линий разломов, интерпретации спутниковых снимков и направления смещения эоценовых вулканических и мезозойских осадочных пород (см. рис. 1Б) [Beugi et al., 2016].

Материалы и методы исследований. Оценка активной тектоники с использованием морфотектонических индексов основана на изучении геологического строения и проявлений тектонических процессов. Морфотектонические индексы, связанные с тектонической активностью, включают извилистость горного фронта (индекс Smf) [Bull, McFadden, 1977], отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (индекс Vf) [Bull, McFadden, 1977, 1978], отношение ширины долины к высоте ее бортов (индекс V) [Bull, 1978, 2007] и индекс градиента потока (SL) [Bull, McFadden, 1977, 1978].

Извилистость горного фронта (Smf) рассчитывалась по формуле:

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls}, \quad (1)$$

где Lmf – длина горного фронта у подножия, а Ls – прямая длина горного фронта [Bull, McFadden, 1977; Keller, Pinter, 2002]. Этот индекс отражает баланс между эрозией, которая создает нерегулярные или извилистые фронты, и тектоническими силами, которые создают прямой горный фронт, совпадающий с тектоническим разломом [Mayer, 1986; Keller, Pinter, 2002]. Согласно классификации [Bull, 2007], извилистость горного фронта делится на три категории: 1) высокоактивный горный фронт ($Smf < 1,5$); 2) горный фронт с умеренной активностью ($Smf = 3-1,5$); 3) горный фронт с низкой активностью (неактивный) ($Smf > 3$).

Отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (Vf) рассчитывалось по формуле:

$$Vf = \frac{2Vfw}{(Eld - Esc) + (Erd - Esc)}, \quad (2)$$

где Vfw – ширина дна долины, Eld и Erd – высота левого и правого бортов долины, соответственно, Esc – высота дна долины [Bull, McFadden, 1977].

По различным значениям индекса Vf все долины можно разделить на V-образные и U-образные. Если значение индекса низкое (между 0,05 и 0,5), это указывает на V-образные долины, изрезанные ручьями, связанные с высокими скоростями подъема, а если индекс большой – на U-образные долины с низкими скоростями подъема [Keller, Pinter, 2002]. В [Bull, McFadden, 1977] описано численное значение $Vf = 0,99$ как граница между активной и неактивной тектоническими зонами.

Отношение ширины долины к высоте ее бортов (V) [Bull, 2007] определялось по формуле:

$$Vf = \frac{2Vw}{(Eld - Esc) + (Erd - Esc)}, \quad (3)$$

где Vw – ширина долины.

Отношение V полезно для обнаружения длительных поднятий в разных типах пород и для различных климатических условий, а также для обнаружения активных тектонических зон в пассивных участках, но оно не подходит для оценки районов с умеренной тектонической активностью [Wolman, Gerson, 1978]. Значения этого индекса ниже шести указывают на активные тектонические районы, а в пассивных областях его среднее значение обычно выше семи [Bull, 2007].

Индекс градиента длины потока (SL) [Bull, 2007] определялось как

$$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} \times L, \quad (4)$$

где $\Delta H/\Delta L$ – градиент потока в конкретном месте (ΔH – амплитуда высот на расчетном участке, а ΔL – длина участка), а L – общая длина водотока от точки расчета индекса вверх по течению до истока [Hack, 1973; Keller, Pinter, 2002]. Индекс SL примерно связан с мощностью потока; он особенно чувствителен к изменениям уклона и литологии. Эта чувствительность позволяет оценить взаимосвязь между возможной тектонической активностью и сопротивлением породы. Соответственно, величина индекса высока в районах, где породы обладают значительной устойчивостью или где присутствует активная тектоника. Следовательно, аномально высокие значения SL или их колебания в породе с одинаковым сопротивлением являются возможным показателем активной тектоники [Keller, 1986].

Также существуют такие признаки, указывающие на неотектоническую активность региона, как смещение конусов выноса временных водотоков и увеличение скорости глубинной эрозии.

Для идентификации и расчета вышеуказанных индексов и признаков мы использовали топографические карты масштаба 1:25 000, геологические карты масштаба 1:100 000, спутниковые снимки и полевые наблюдения. Цифровая модель рельефа (ЦМР) высокого разрешения необходима для получения точных результатов расчетов геоморфологических индексов. В этом исследовании изображения ЦМР были получены путем оцифровки изолиний топографических карт масштаба 1:25 000 с заложением 10 м. Для целей данного исследования использовались стандартные методы в программах ArcGIS ($V10$), Global Mapper ($V15$) и Envi ($V5,1$).

Результаты исследований и их обсуждение. *Морфотектонические индексы в сегменте разлома Зефре.* Индекс извилистости горных фронтов (Smf). В данном исследовании индекс извилистости горных фронтов был измерен в 50 точках по формуле (1). На рис. 2А показано, как рассчитать индекс

извилистости горного фронта для нескольких участков в сегменте разлома Зефре. Индекс варьирует в зоне разлома от 1 до 1,59 (см. рис. 2Б): минимальное значение отмечено в точке 10 в северной части разлома Зефре, а максимальное – в точке 46 в его средней части. В среднем для зоны разлома индекс извилистости горного фронта составляет 1,17. Граница горного фронта с равниной показана в средней (рис. 3А) и хвостовой (рис. 3Б) частях разлома Зефре в мезозойских осадочных породах. В итоге, результаты полевых наблюдений и расчетов по индексу извилистости горных фронтов позволяют отнести этот разлом к категории 1 по классификации [Bull, McFadden, 1977], что указывает на молодую активность зоны разлома на исследуемой территории.

Отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (V_f) было измерено по формуле (2) для 125 долин вдоль зоны разлома Зефре (рис. 4А). Самый низкий индекс V_f рассчитан в долине 18 (0,059), а самый высокий составляет 2,14 в долине 30 (рис. 4Б).

В среднем индекс V_f для зоны разлома Зефре составляет 0,78, что указывает на активную тектонику в районе.

Отношение ширины долины к высоте ее бортов (V) рассчитано по формуле (3) (см. рис. 4В). Максимальная величина V составила 13,67 в долине 14, минимальная – 1,6 – в долине 80. Среднее значение этого индекса для всех долин, рассчитанное вдоль зоны разлома Зефре, составляет 6,92. В целом высокие значения индекса V обусловлены существенной тектонической активностью в районе исследований.

Индекс градиента длины потока (SL) рассчитывался для 25 основных временных потоков к северу от южной части разлома Зефре по формуле (4) (рис. 5). Значения индекса SL варьируют с 152 до 374 м. Так как в бассейнах нет различий в литологии (вулканические породы), различие в градиентах длины потока в бассейнах можно объяснить тектонической активностью и климатическими условиями.

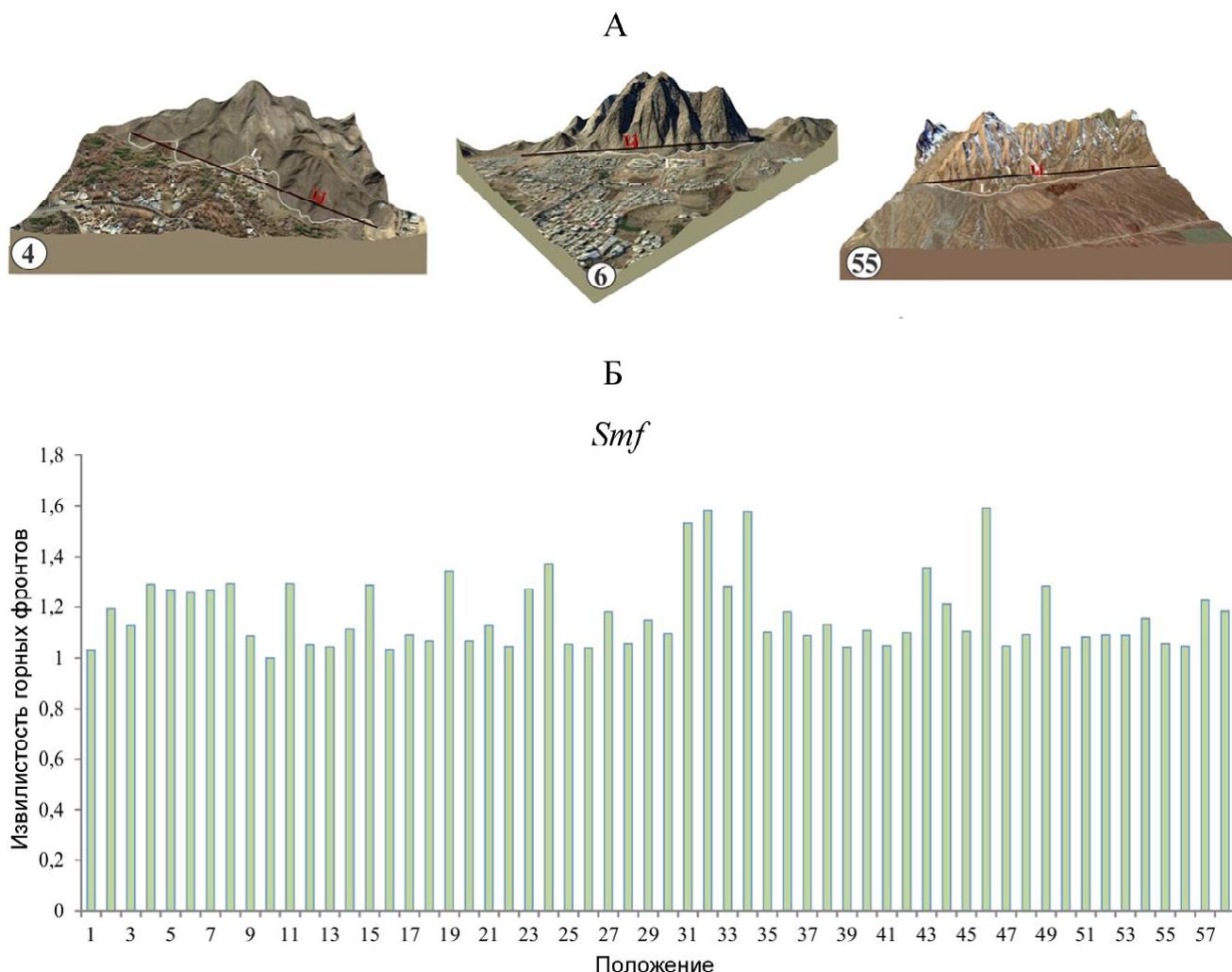


Рис. 2. Расчет индекс Smf . А – расчет индекса Smf на участках 4, 6 и 55 вдоль зоны разлома Зефре; Б – численные значения измеренного индекса Smf вдоль зоны разлома Зефре

Fig. 2. Calculation of the Smf index. А – calculation of the Smf index in sections 4, 6 and 55 along the Zefreh fault zone; Б – numerical values of the measured Smf index along the Zefreh fault zone

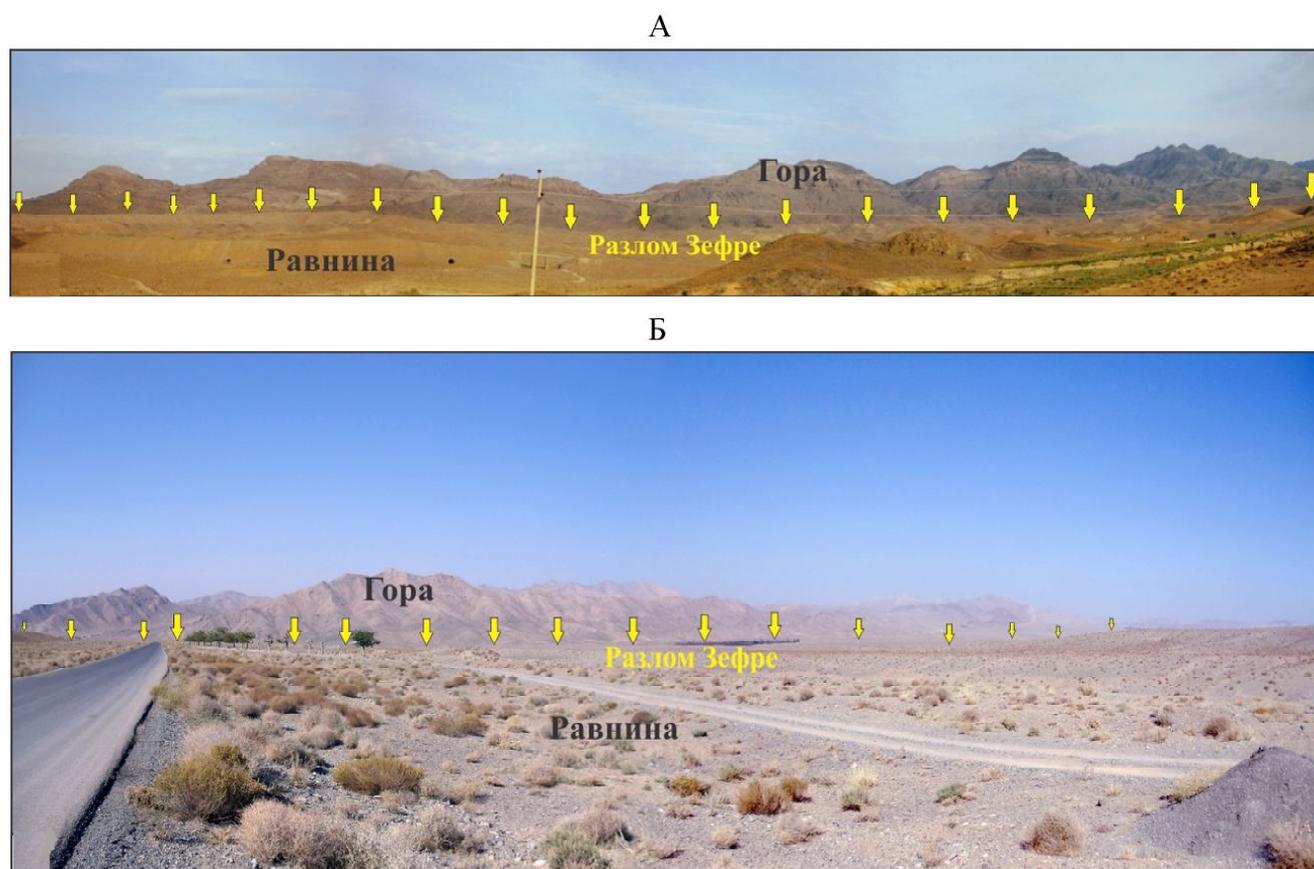


Рис. 3. Положение границы горного фронта с равниной в середине (А) и в конце (Б) зоны разлома Зефре

Fig. 3. Location of a boundary between the mountain front and the plain in the middle (A) and at the end (Б) of the Zefreh fault zone

Признаки тектонической активности в сегменте разлома Зефре. Смещение русел рек. Деформация в тектонически активных регионах оказывает существенное влияние на речные системы. Сдвиговые разломы приводят к латеральному смещению рек, а также к другим геологическим и геоморфологическим маркерам, в то время как поднятие вызывает врезание русла и углубление долины реки [Трифонов, 2016; Huang, 1993; Fu et al., 2005; Cowgill et al., 2009]. Характер смещения потока вдоль сдвиговых разломов может говорить об их кинематике и о том, как тектонические нарушения влияют на эволюцию бассейна в целом [Трифонов, 1999; Fu et al., 2005; Keller, Pinter, 1996].

В районе исследований выявлено 11 водных потоков, которые были смещены от основного течения разломом Зефре и его ответвлениями (рис. 6). Амплитуда смещения меняется вдоль разлома, максимальное значение правых смещений речных потоков в северной части зоны разлома Зефре в районе г. Натанз составило ~1,3 км со скоростью скольжения ~0,72 мм/год (см. рис. 6А). Смещенные водные потоки в средней части разлома изображены на рис. 6Б, В. Принимая во внимание возраст отложений в этом районе, который составляет около 1,8 млн лет, коэффициент смещения для каждого потока рассчитывается в таблице 1.

Проллювиальные веера (конусы выноса) – это морфологические веерообразные образования небольших или очень больших размеров, которые образуются на склоне горы, поскольку внезапное наводнение или временный водоток переносят большое количество песка и грязи в засушливых и полузасушливых климатических условиях [Шанцер, 1951]. Проллювиальные веера, в основном, формируются в Q1–Q4 (Quaternary). Тектонические особенности территории – такие, как степень поднятия, погружения и продольное смещение участков разломов – могут влиять на общую форму конусов выноса и их эволюцию [Bull, 2007]. Таким образом, морфологические и морфометрические характеристики конусов выноса дают нам важную информацию о новых видах активности в этом регионе, поскольку они являются самыми молодыми геоморфологическими образованиями. Одним из результатов активности разломов является создание асимметричных и изогнутых конусов выноса над продольной осью главного русла реки.

Зона разлома Зефре создала асимметричный и изогнутый конус выноса по отношению к главной оси реки (рис. 7). Его формирование является одним из доказательств сдвиговой активности, правосторонней кинематики. На исследуемой территории много конусов выноса, которые отделены от разломов.

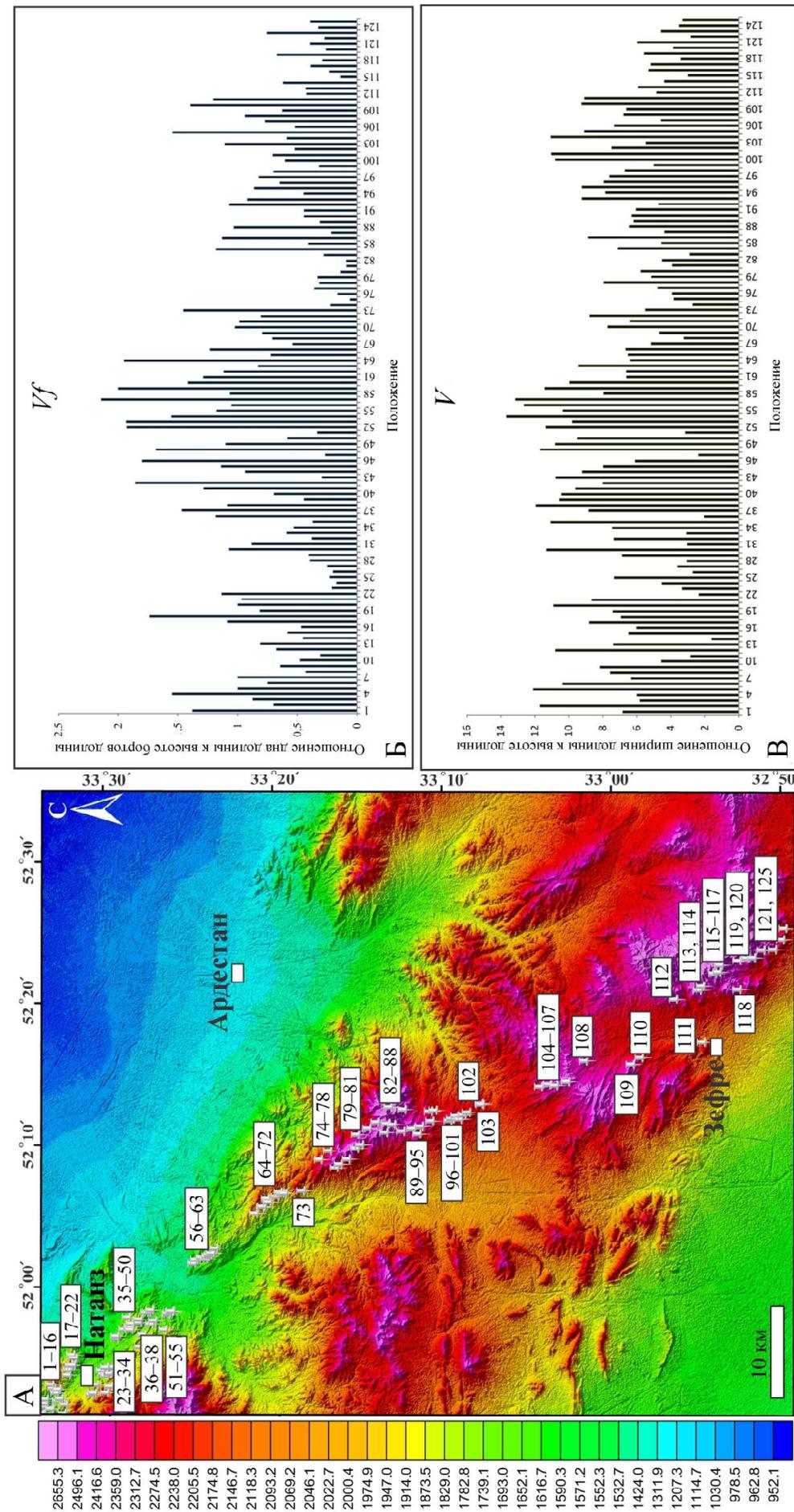


Рис. 4. Расчет индексов V_f и V : А – положение долин вдоль зоны разлома Зефре на изображении ЦМР; Б – значения индекса V_f ; В – значения индекса V вдоль зоны разлома Зефре
 Fig. 4. Calculation of the V_f and V indices: А – location of valleys along the Zefreh fault zone on the DEM image; Б – values of the V_f index; В – values of the V index along the Zefreh fault zone



Рис. 5. Диаграмма распределения значений SL вдоль разлома Зефре

Fig. 5. Diagram of the distribution of SL values along the Zefreh fault

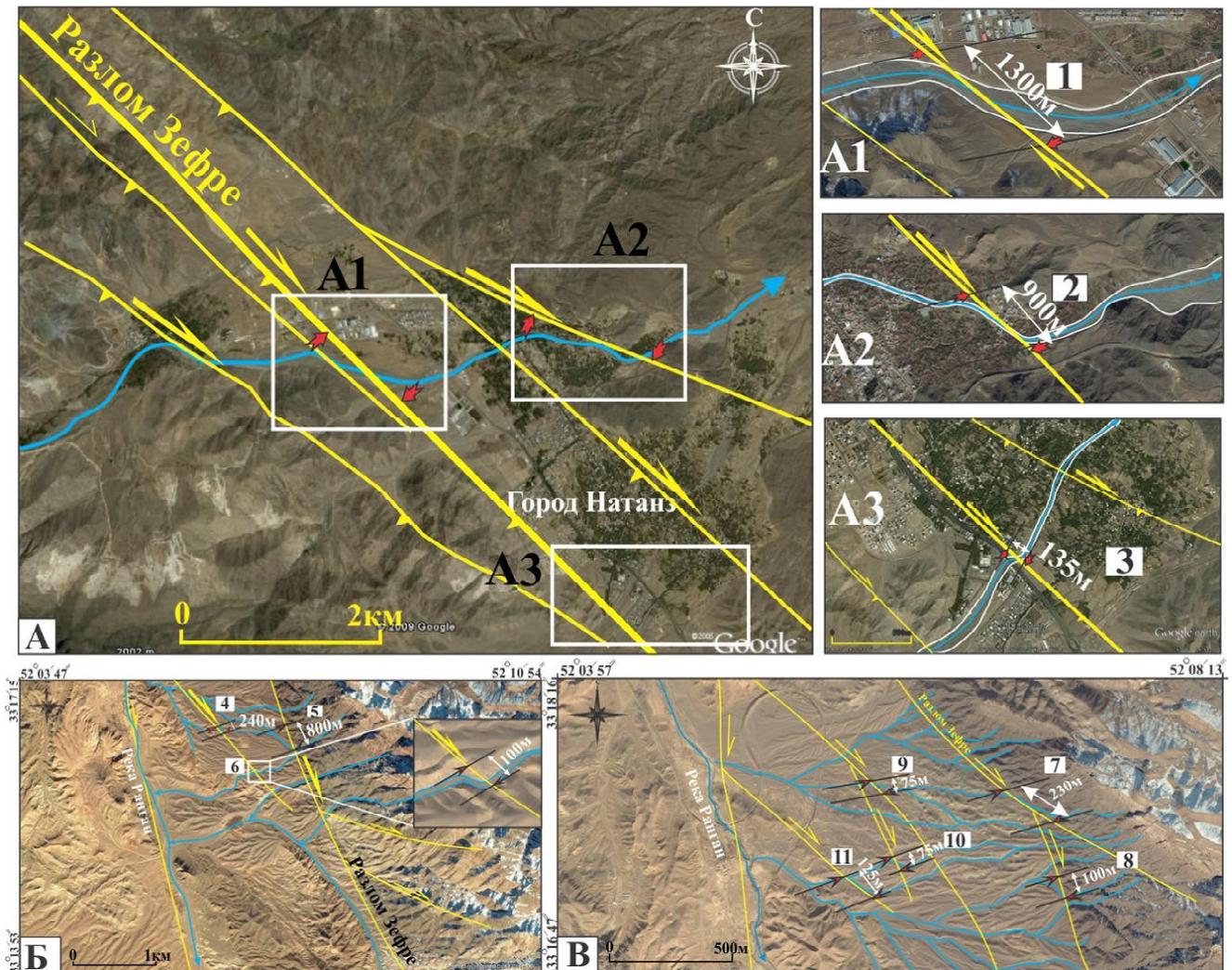


Рис. 6. Смещение водного потока вдоль разлома Зефре на спутниковых снимках: А – правостороннее смещение водного потока вдоль разлома Зефре к северу от г. Натанз; Б, В – правостороннее смещение потока в средней части разлома Зефре

Fig. 6. Displacement of water stream along the Zefreh fault on the satellite images: А – right-lateral displacement of a stream along the Zefreh fault in the north of the Natanz town; Б, В – right-lateral displacement of a stream in the middle part of the Zefreh fault

Таблица 1

Измеренная скорость смещения водных потоков в районе исследования

№	Амплитуда смещения за 1,8 млн лет, м	Частота проскальзывания, мм/год	Механизм перемещения
1	1300	0,72	Правосторонний
2	900	0,5	Правосторонний
3	135	0,08	Правосторонний
4	240	0,13	Правосторонний
5	800	0,44	Правосторонний
6	100	0,06	Правосторонний
7	230	0,13	Правосторонний
8	100	0,06	Правосторонний
9	75	0,04	Правосторонний
10	75	0,04	Правосторонний
11	125	0,1	Правосторонний

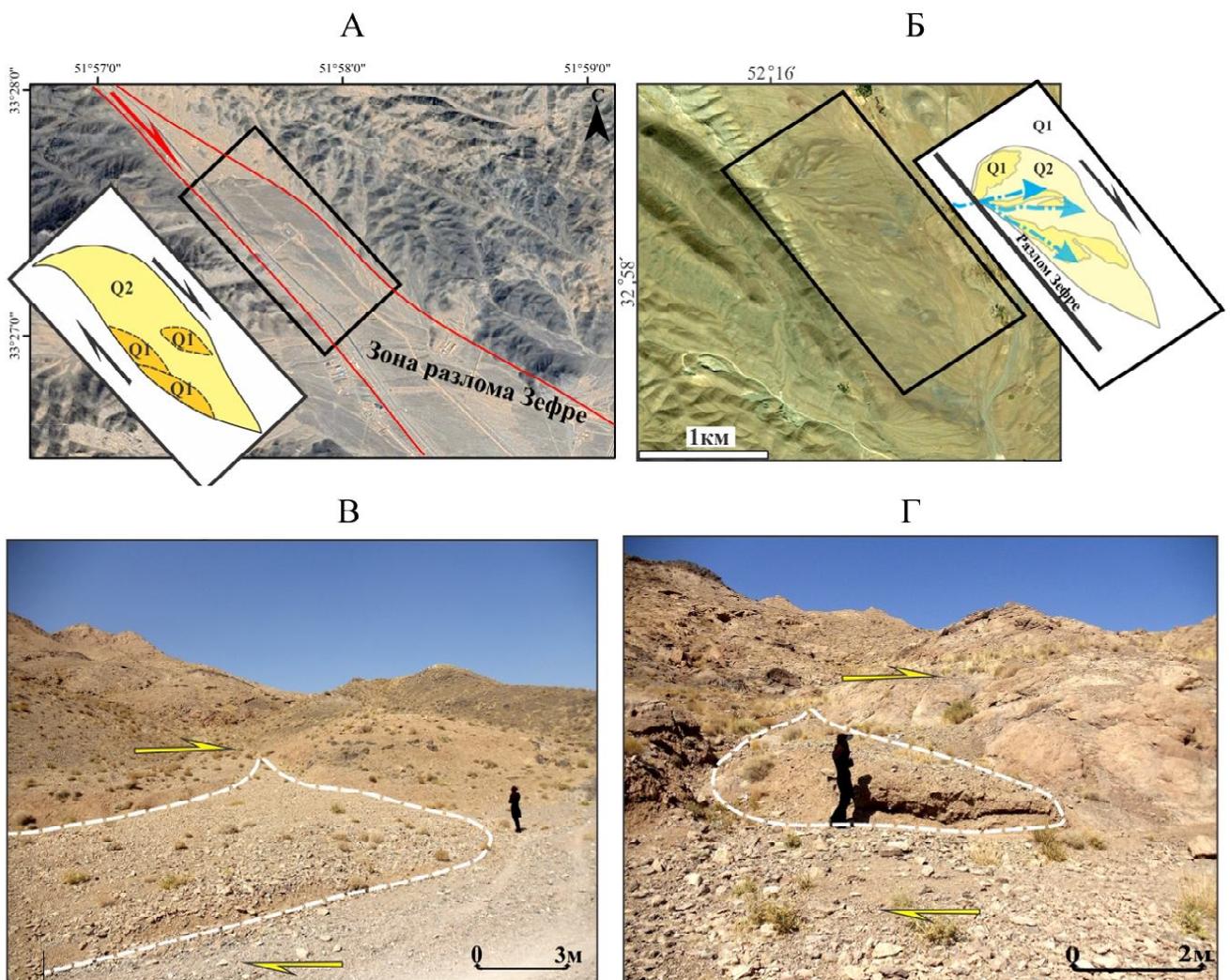


Рис. 7. Пролувиальные веера вдоль зоны разлома Зефре на спутниковых снимках и полевых фотографиях: А – пролувиальный веер в 5 км к югу от Натанза, сформированный под влиянием правостороннего движения по разлому Зефре; Б – пролувиальный веер в 10 км к северу от деревни Зефре. Древний конус выноса (Q1), молодой конус выноса (Q2); В, Г – срез и смещение конуса выноса в 2 км к северу от деревни Зефре под влиянием правостороннего движения по разлому

Fig. 7. Proluvial fans along the Zefreh fault zone on the satellite image and field photographs: А – proluvial fan 5 km south of the Natanz town, formed under the influence of right-lateral movement along the Zefreh fault; Б – proluvial fan 10 km north of the Zefreh village. Old alluvial fan (Q1), young alluvial fan (Q2); В, Г – the cut and displacement of the alluvial fan 2 km north of the Zefreh village under the influence of right-lateral movement along the fault

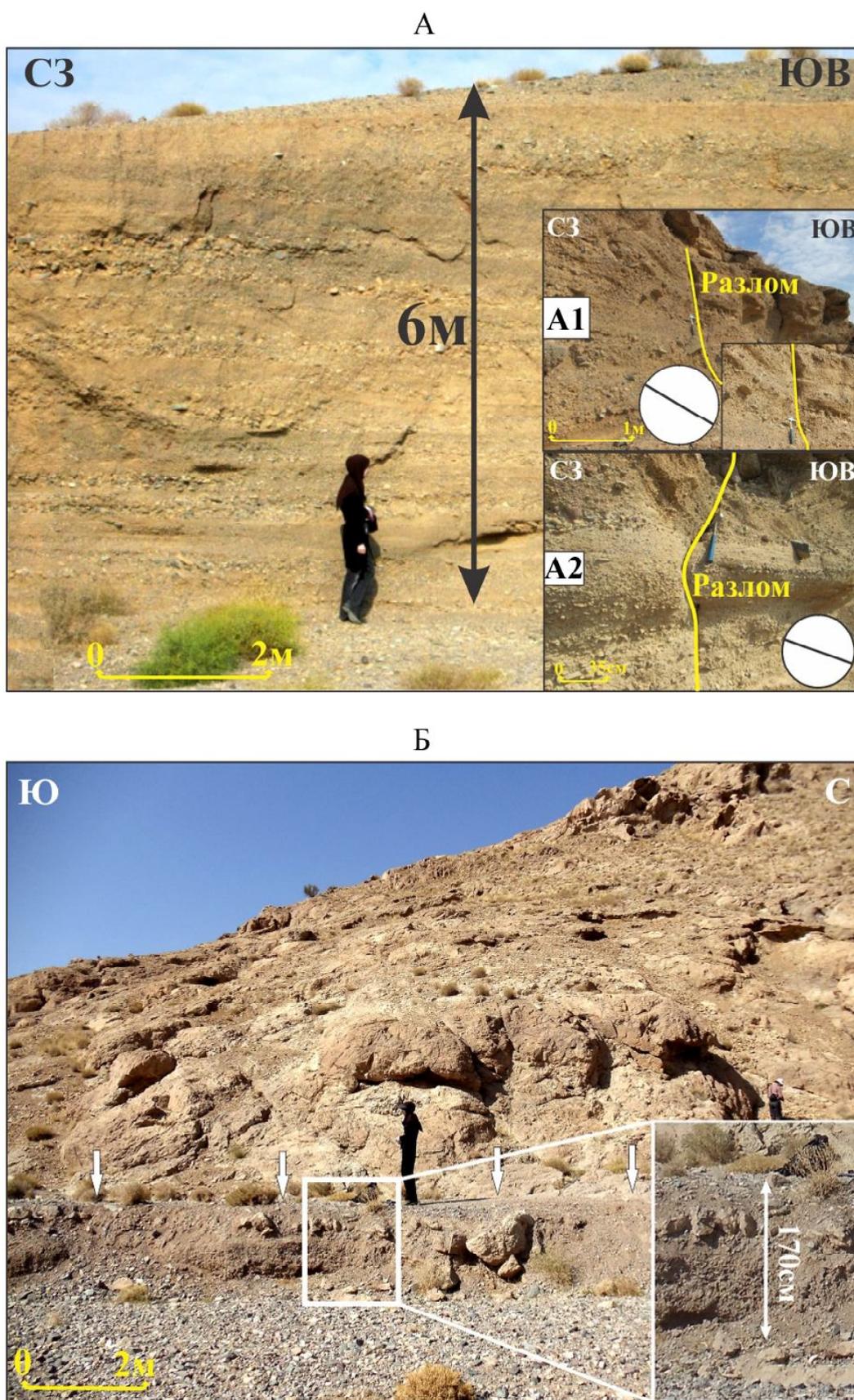


Рис. 8. Речные террасы вдоль зоны разлома Зефре: А – речная терраса высотой 6 м вдоль зоны разлома Зефре; Б – речная терраса высотой 170 см, сформированная на севере деревни Зефре

Fig. 8. River terraces along the Zefreh fault zone: А – 6 m high river terrace along the Zefreh fault zone; Б – 170 cm high river terrace formed in the north of the Zefreh village

Некоторые их примеры показаны на рис. 7В в 5 км к югу от Натанза и в 10 км к северу от пос. Зефре.

Речные террасы. Речная терраса – горизонтальный или слегка наклоненный участок речной долины выше поймы, сформированный флювиальными процессами. Причин, ведущих к образованию террас, много. Как правило, террасы возникают при опускании базиса эрозии и образования реки нового профиля равновесия: русло опускается, прорезая пойму, которая становится террасой. Изредка террасы возникают при перекосах земной поверхности, вызванных тектоническими движениями, а также вследствие климатических изменений [Леонтьев, Рычагов, 1988]. В тектонически активных регионах

важно оценить роль влияния разломов и регионального подъема на развитие речных террас и эволюцию гидрографической сети. Во время продолжительной эволюции региона подъем и связанные с ним изменения уровня базиса эрозии контролируют генезис речных террас [Maddy et al., 2000].

На рис. 8А показана речная терраса вдоль зоны разлома Зефре с интенсивной активностью в четвертичных отложениях (у реки). Следы разломов указывают на то, что данный район является тектонически активным. Вдоль этой речной террасы формируются крутопадающие разломы, параллельные разлому Зефре, которые разрезают плейстоценовые отложения. На рис. 8А1, А2 пока-

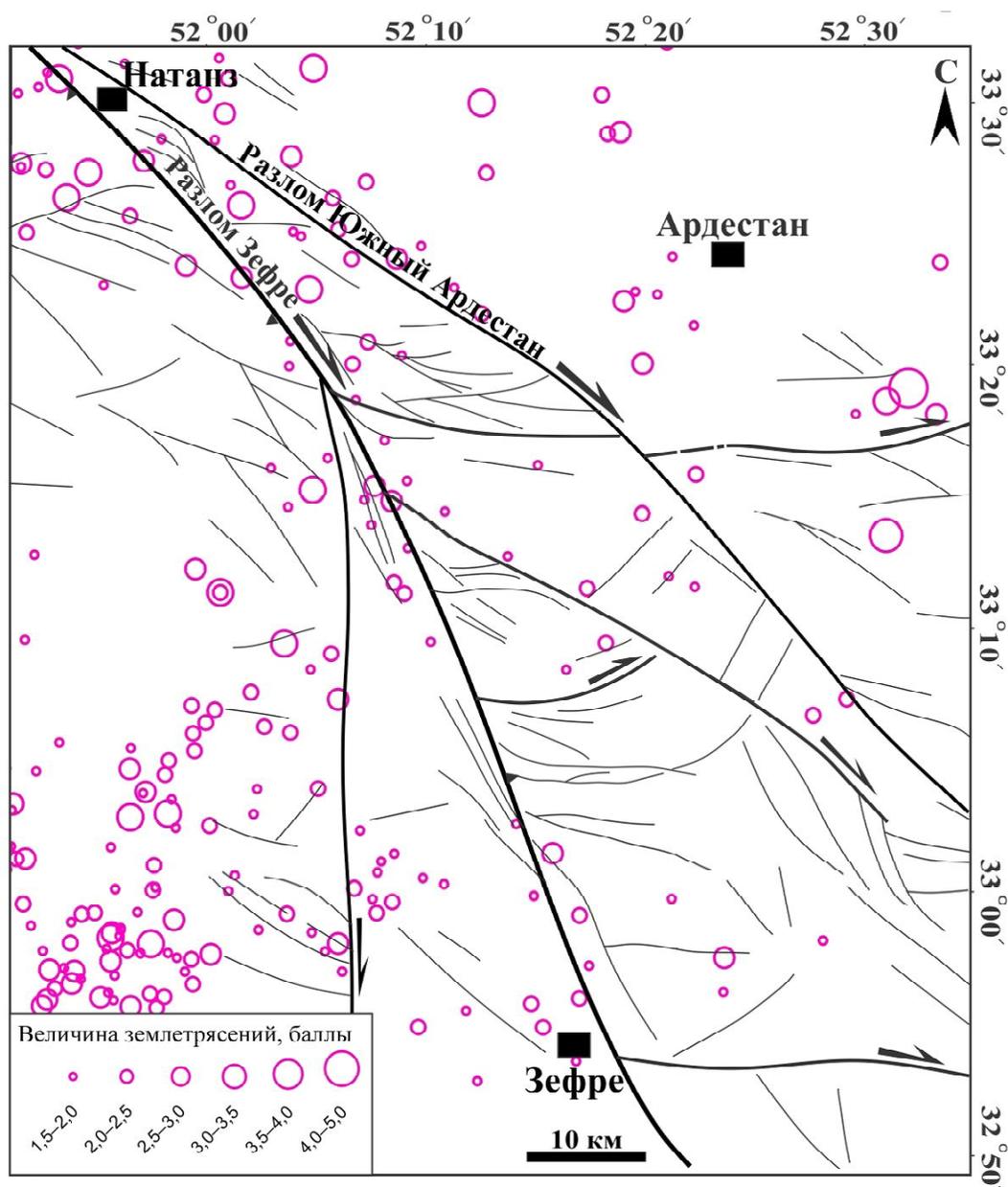


Рис. 9. Изображение эпицентров землетрясений на исследуемой территории (данные Сейсмологического института Геофизического университета Тегерана)

Fig. 9. The distribution of earthquake epicenters over the study area (data from the Seismological Institute of the Tehran Geophysical University)

заны вертикальные разломы с азимутом простира-ния 110 и 120°, которые пересекают речные терра-сы. Речная терраса высотой 170 см на севере от пос. Зефре указывает на молодую активность ис-следуемого участка разлома (см. рис. 8Б).

Сейсмическая активность зоны разлома Зефре.

Разломы – один из основных типов геологических структур в Иране, являющихся средоточием разру-шительных землетрясений. Таким образом, выявле-ние разломов, анализ и оценка уровня их сейсмиче-ской опасности помогут нам определить сейсмиче-ский потенциал и активность каждого из них [Zare, 2005]. Разлом Зефре является одним из наиболее активных разломов в центральной части УДВД; вдоль него было зафиксировано большое количе-ство землетрясений.

В данном исследовании материалы, собранные сейсмической базой данных Института геофизики Те-геранского университета, были вынесены на карту ак-тивных разломов исследуемой территории (на рис. 9 отмечены кружками). Эпицентры землетрясений лежат недалеко от Натанза и в средней части разлома. Их величина вокруг зоны разлома Зефре (максимум 4 балла

по шкале Рихтера) указывает на современную текто-ническую активность в исследуемом районе.

Выводы:

– результаты исследования морфотектонических и геологических данных дают относительную клас-сификацию современной тектонической деятельнос-ти. Использование только одного индекса для иссле-дования зоны сейсмоактивности часто иллюстриру-ет тектоническую активность области ограниченно или даже дает противоречивые результаты из-за ли-тологических различий в местонахождении разлома. Наш анализ основан на применении нескольких ин-дексов в зоне разлома Зефре, что приводит к более весомым результатам (табл. 2);

– все морфотектонические индексы, применя-емые в данном исследовании, подразумевают ак-тивную современную тектонику в регионе. Такие признаки тектонической активности, как рассече-нность разломами четвертичных отложений и сме-щение траекторий водных потоков, а также наличие и распространение землетрясений, подтверждают активность разломов в четвертичное время в зоне разлома Зефре.

Таблица 2

Результаты оценки морфотектонических индексов и признаков тектонической активности вдоль зоны разлома Зефре

Индексы	Количественное описание	Качественное описание
Извилистость горных фронтов (<i>Smf</i>)	1,17	Активный
Отношение ширины дна долины к высоте ее бортов (<i>If</i>)	0,78	Активный
Отношение ширины долины к высоте ее бортов (<i>I</i>)	6,92	Умеренно активный
Градиент длины потока (<i>SL</i>)	С 152 до 374 м	Активный
Смещение реки из-за разломов	–	Активный
Проллювиальный веер	–	Активный
Речная терраса	–	Активный
Образование травертина	–	Активный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Апродов В.А. Неотектоника, вулканические провинции и великие сейсмические пояса мира. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. 221 с.

Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология: учеб-ник для студ. вузов. М.: Высшая школа, 1988. 319 с.

Лотоцкий Г.И. Общий геоморфологический анализ: ме-тодическое пособие. Саратов: СГУ, 2012. 46 с.

Обручев В.А. Основные черты кинематики и пластики неотек-тоники. М.: Известия АН СССР. Сер. Геол. 1948. № 5. С. 14–22.

Симонов Ю.Г. Геоморфология. Методология фундамен-тальных исследований. СПб.: Питер, 2005. 427 с.

Трифонов В.Г. Неотектоника. Дубна: Государственный университет «Дубна», 2016. 310 с.

Трифонов В.Г. Активная тектоника и геоэкология // Про-блемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 44–62.

Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и фор-мирования аллювиальных свит // Труды ин-та геологических наук. Вып. 135. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 274 с.

Beygi S., Nadimi A., Safaei H. Tectonic history of seismogenic fault structures in Central Iran, *Journal of Geosciences*, 2016, vol. 61(2), p. 127–144.

Bull W.B. *Tectonic Geomorphology of Mountains. A New Approach to Paleoseismology*, Wiley-Blackwell, 2007, 328 p.

Bull W.B. *Geomorphic tectonic activity classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California*, US Geol. Surv. Contact Rep. 14–08–001–G–394, Menlo Park, Calif, 1978, 59 p.

Bull W.B., McFadden L.D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California, *Geomorphology in Arid Regions*, Doehring D.O. (ed.), Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, 1977, p. 115–138.

Burbank D.W., Anderson R.S. *Tectonic Geomorphology*, Pennsylvania State University, 2001, p. 80–198.

Cowgill E., Gold R.D., Chen X.H., Wang X.F., Arrowsmith J.R., Southon J. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet, *Geology*, 2009, vol. 37, p. 647–650.

Fu B., Awata Y., Du J., He W. Late Quaternary systematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet, *Geomorphology*, 2005, vol. 71, p. 278–292.

Hack J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index, *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1973, vol. 1(4), p. 421–429.

Huang W. Morphologic patterns of stream channels on the active Yishi Fault, southern Shandong Province, Eastern China: implications for repeated great earthquakes in the Holocene, *Tectonophysics*, 1993, vol. 219, p. 283–304.

Keller E.A. Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes, *Active Tectonics studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 136–147.

Keller E.A., Pinter N. *Active tectonics: Earthquake Uplift and Landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2002, 362 p.

Keller E.A., Pinter N. *Active tectonics: Earthquake Uplift and Landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996, 338 p.

Lykov Y.V., Gorelikov V.G., Gantulga B. Analytical research and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87(2), p. 022012, DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022012.

Maddy D., Bridgland D.R., Green C. Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace record, *Geomorphology*, 2000, no. 33, p. 167–181.

Mayer L. Tectonic geomorphology of escarpments and mountain fronts, *Active Tectonics, Studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 125–135.

Willgoose G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. A coupled channel network growth and hillslope evolution model. I. Theory, *Water Resources Research*, 1991, vol. 27(7), p. 1671–1684.

Whipple K.X., Tucker G.E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs, *Journal of Geophysical Research*, 1999, no. 104, p. 17 661–17 674, DOI: 10.1029/1999JB900120.

Wolman M.G., Gerson R. Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology, *Earth Surface Processes*, 1978, vol. 3(2), p. 189–208.

Zare M. *Introduction to Applied Seismology*, First Edition, Tehran, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2005, 340 p.

Поступила в редакцию 27.12.2019

После доработки 21.06.2020

Принята к публикации 06.11.2020

S. Beygi¹, I.V. Talovina²,
N.S. Krikun³

**EVALUATION OF NEOTECTONIC ACTIVITY
IN THE URUMIEH-DOKHTAR VOLCANIC ARC (IRAN),
BASED ON THE CALCULATION OF MORPHOTECTONIC INDICES**

The article deals with the analysis of morphotectonic indices as a principal tool to identify the areas experiencing rapid tectonic deformations, or estimate relative variations of tectonic activity in a specific area. We applied the analysis in the Zefreh fault zone, located within the Urumieh-Dokhtar Volcanic Arc (UDVA) in the Central Iran. The Zefreh fault is a most important fault in the central part of the UDVA. The Zefreh fault stretches for 130 km in NW–SE direction from the Natanz town in the north to the Zefreh village in the south. The Zefreh fault cuts and displaces the UDVA along its whole trace. The dextral strike-slip component confirmed by tectonic features was shown based on the analysis of fault lineations, and interpretation of Landsat satellite images and field data. We calculated morphotectonic indices along the Zefreh fault zone and evaluated the tectonic activity of the area. We used topographic maps, geological maps, satellite images, and field observations for identification and calculation of morphotectonic indices. A digital elevation model (DEM) was obtained by digitizing contour lines from topographic maps. Standard methods in ArcGIS, Global Mapper, and Envi programs were used to calculate indices and identify tectonic features. The coefficients of mountain- front sinuosity (Smf), ratio of the valley floor width to the valley slope height (Vf) and ratio of the valley width to the valley slope height (V) average to 1,17, 0,78 and 6,92 respectively. In addition, the stream length gradient index (SL), the displacement of river valleys, the presence of asymmetric and curved proluvial fans and the increasing rate of vertical erosion, as well as the residual effects of fault movement in Quaternary sediments, indicate that the Zefreh fault is still active.

Key words: tectonic deformation, volcanic arc, Zefreh fault, seismic activity, displacement of streams, proluvial fans

¹ Saint Petersburg Mining University, Geological Prospecting Faculty, Department of Historical and Dynamic Geology, PhD student; e-mail: beygi.soheyla@yahoo.com

² Saint Petersburg Mining University, Geological Prospecting Faculty, Department of Historical and Dynamic Geology, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: i.talovina@gmail.com

³ Saint Petersburg Mining University, Geological Prospecting Faculty, Department of Historical and Dynamic Geology, PhD student; e-mail: nskrikun@gmail.com

REFERENCES

- Aprodov V.A. Neotektonika, vulkanicheskie provintsii i velikie sejsmicheskie poyasa mira* [Neotectonics, volcanic provinces and the great seismic belts of the world], Moscow, Moscow University Publ., 1965, 221 p. (In Russian)
- Beygi S., Nadimi A., Safaei H.* Tectonic history of seismogenic fault structures in Central Iran, *Journal of Geosciences*, 2016, vol. 61(2), p. 127–144.
- Bull W.B.* *Geomorphic tectonic activity classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California*. U. S. Geol. Surv. Contact Rep. 14–08–001–G–394, Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, Menlo Park, Calif, 1978, 59 p.
- Bull W.B.* *Tectonic Geomorphology of Mountains. A New Approach to Paleoseismology*, Blackwell, 2007, 316 p.
- Bull W.B., McFadden L.D.* Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault. California. In: Doehring D.O. (ed.), *Geomorphology in Arid Regions*, Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, 1977, p. 115–138.
- Burbank D.W., Anderson R.S.* *Tectonic Geomorphology*, Malden, Mass., Blackwell Science, 2001, 274 p.
- Cowgill E., Gold R.D., Chen X.H., Wang X.F., Arrowsmith J.R., Southon J.* Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet, *Geology*, 2009, vol. 37, p. 647–650.
- Fu B., Awata Y., Du J., He W.* Late Quaternary systematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet, *Geomorphology*, 2005, vol. 71, p. 278–292.
- Hack J.T.* Stream-profile analysis and stream-gradient index, *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1973, vol. 1(4), p. 421–429.
- Huang W.* Morphologic patterns of stream channels on the active Yishi Fault, southern Shandong Province, Eastern China: implications for repeated great earthquakes in the Holocene, *Tectonophysics*, 1993, vol. 219, p. 283–304.
- Keller E.A.* Investigation of active tectonics: use of surficial earth processes, *Active Tectonics studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 136–147.
- Keller E.A., Pinter N.* *Active tectonics: earthquake, uplift, and landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2002, 362 p.
- Keller E.A., Pinter N.* *Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996, 338 p.
- Leontiev O.K., Rychagov G.I.* *Obschaya geomorfologiya* [General geomorphology], Textbook for stud. geospecialist. Universities, 2nd ed., revised and add., Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1988, 319 p.
- Lototsky G.I.* *Obschij geomorfologicheskij analiz* [General geomorphologic analysis], Saratov, Saratov State University Publ., 2012, 46 p.
- Lykov Y.V., Gorelikov V.G., Gantulga B.* Analytical research, and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87(2), p. 022012, DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022012.
- Maddy D., Bridgland D.R., Green C.* Crustal uplift in southern England: evidence from the river terrace record, *Geomorphology*, 2000, no. 33, p. 167–181.
- Mayer L.* Tectonic geomorphology of escarpments and mountain fronts, *Active Tectonics, Studies in Geophysics*, Wallace R.E. (ed.), Nat. Acad. Press, Washington, D.C., 1986, p. 125–135.
- Obruchev V.A.* Osnovnye cherty kinematiki i plastiki neotektoniki [Principal features of kinematics and plastics of neotectonics], *Izv. USSR Academy of Sciences. Ser. Geol.*, 1948, no. 5, p. 14–22.
- Shantser E.V.* *Allyuvij ravninnykh rek umerennogo poyasa i ego znachenie dlya poznaniya zakonomernostej stroeniya i formirovaniya allyuvialnykh svit* [Alluvium of lowland rivers of the temperate zone and its importance for understanding the laws of the structure and formation of alluvial suites], *Trudy in-ta geol. nauk, USSR Academy of Sciences*, 1951, no. 135, 274 p.
- Simonov Yu.G.* *Geomorfologiya. Metodologiya fundamentalnykh issledovaniy* [Geomorphology. Methodology of basic research], St. Petersburg, Piter Publ., 2005, 427 p.
- Trifonov V.G.* *Neotektonika* [Neotectonics], State University "Dubna" Publ., 2016, 310 p.
- Trifonov V.G.* [Active tectonics and geocology], *Problemy geodinamiki litosfery* [Problems of the geodynamics of the lithosphere], Moscow, Nauka Publ., 1999, p. 44–62.
- Whipple K.X., Tucker G.E.* Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research*, 1999, no. 104, p. 17 661–17 674, DOI: 10.1029/1999JB900120.
- Willgoose G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I.* A coupled channel network growth and hillslope evolution model. I. Theory, *Water Resources Research*, 1991, vol. 27(7), p. 1671–1684, DOI: 10.1029/1999JB900120.
- Wolman M.G., Gerson R.* Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes*, 1978, vol. 3(2), p. 189–208.
- Zare M.* *Introduction to Applied Seismology*. First Edition, Tehran, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2005, 340 p.

Received 27.12.2019

Revised 21.06.2020

Accepted 06.11.2020