

2. Flugel, E. *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. Springer, 2004, 976 p.

3. Obrovets, S. M., Nikulenko, E. F. Bagaeva, V. I. Usloviya formirovaniya otlozheniy korenevskoy pachki verhnesholenosnoy formatsii i perspektivy ikh neftenosnosti [The conditions for the formation of sediments of the root pack of the upper saliferous formation and the prospects for their oil content]. *Effektivnye puti poiskov, razvedki i razrabotki zalezhej nefti Belarusi* [Effective Ways of Exploration, Exploration and Development of Belarus Oil Reserves]. Gomel, 2007, pp. 135–147.

4. Zhemchugova, V. A. *Rezervuarnaya sedimentologiya karbonatnykh otlozheniy* [Reservoir sedimentology of carbonate deposits]. Moscow, EAGE Geomodel Publ., 2014, 232 p.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ЮЖНОГО СКЛОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Бондаренко Николай Антонович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Кубанский государственный университет, Российская Федерация, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: nik_bond@mail.ru

Любимова Татьяна Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Кубанский государственный университет, Российская Федерация, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: TV-Luy@yandex.ru

В связи с интенсивным освоением территории Черноморского побережья Кавказа наибольшую актуальность приобретают опережающие инженерно-геотектонические исследования при детальном сейсмическом районировании, а также при проведении инженерно-геологических изысканий под строительство объектов повышенного уровня ответственности. В ходе сеймотектонических исследований в пределах Анапско-Геленджикского участка южного склона С-3 Кавказа установлено, что очаги сейсмических событий образуют визуально выделяемые линейно-ориентированные зоны (сейсмолинеamentы), характеризующиеся субвертикальной ориентировкой. В плане данные зоны наиболее точно соответствуют выраженным в рельефе новейшим структурам, большинство из которых локализуется в пределах поперечных флексурно-разрывных зон, которые, по-видимому, являются глубокими и долгоживущими мантийными структурами. Построение пространственно-статистических моделей по различным критериям позволило установить кластеризацию сейсмических событий Анапско-Геленджикского участка по значению их магнитуд, причем обнаружена кластеризация точек с низкими значениями. Данные кластеры соответствуют в большей степени линейным сейсмогенерирующим структурам, а не морфоструктурным узлам.

Ключевые слова: геодинамика, неотектоника, линеamentный анализ, сейсмическое событие, очаг землетрясения, магнитуда, глубина очага, пространственная статистика, индекс кластеризации, индекс пространственной автокорреляции

CLUSTERING OF REGIONAL SEISMIC EVENTS OF THE SOUTHERN SLOPE OF THE NORTH-WEST CAUCASUS

Bondarenko Nikolay A., D. Sc. in Geology and Mineralogy, Professor, Kuban State University, 149 Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russian Federation, e-mail: nik_bond@mail.ru

Lyubimova Tatyana V., Ph. D. in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Kuban State University, 149 Stavropol St., Krasnodar, 350040, Russian Federation, e-mail: TV-Luy@yandex.ru

In connection with the intensive development of the territory of the black sea coast of the Caucasus, advanced engineering geotectonic studies in detailed seismic zoning, as well as in the conduct of engineering and geological surveys for the construction of objects of increased responsibility, acquire the greatest relevance. In the course of seismotectonic studies within the Anapa-Gelendzhik section of the southern slope of the S-Z Caucasus, it was found that the foci of seismic events form visually distinguished linearly oriented zones (seismolineaments) characterized by a sub-vertical orientation. In plan, these zones most closely correspond to the latest structures expressed in relief, most of which are localized within transverse flexure-discontinuous zones, which appear to be deep and long-lived mantle structures. Construction of spatial-statistical models according to various criteria allowed to establish clustering of seismic events of the Anapa-Gelendzhik area by the value of their magnitudes, and clustering of points with low values was found. These clusters correspond to linear seismogenerating structures rather than morphostructural nodes.

Keywords: geodynamics, neotectonics, lineamentny analysis, seismic event, seismic center, magnitude, center depth, spatial statistics, index of a clustering, index of spatial autocorrelation

Начало систематического изучения вопросов сейсмичности Кавказа относится к середине 30-х гг. XX в. Многие исследователи с разных позиций производили сопоставление тектонических и сейсмических данных, устанавливали существование палеосейсмодислокаций и пр. [3–5; 8; 10]. В настоящее время планомерные работы по оценке геодинамической активности на шельфе Азово-Черноморского бассейна проводятся ГНЦ ФГУПП «Южморгеология» на специализированном сейсмологическом полигоне с регулярной локальной сетью сейсмических станций [7].

Тектонические структуры играют значительную роль в распределении сейсмических свойств геологической среды [3]. Выявление геологических критериев сейсмичности получило своё развитие в сеймотектоническом методе, который учитывает взаимосвязь между единством происхождения и строения однотипных структур и характеристиками очага и магнитудой землетрясений. Приуроченность очагов землетрясений к участкам пересечения сейсмогенерирующих структур определяется методом сейсмоактивных узлов. Предполагается, что данные структуры явно выражаются в рельефе и могут быть выделены в качестве линеаментов при морфоструктурном анализе и дешифрировании космоаэрофотоснимков. Таким образом, параллельно используется несколько методов, однако существуют противоречия в идентификации зон возникновения очагов землетрясений. Сеймотектонический метод подразумевает, что сильное землетрясение может возникнуть в любой части сейсмогенерирующей структуры, но преимущественно в «окнах» между предшествующими. Метод сейсмоактивных узлов, напротив, предполагает возникновение сильных землетрясений только в определённых участках – в «узлах».

Для Северо-Западного Кавказа отмечается концентрация эпицентров землетрясений в двух крупных сейсмоактивных зонах: Сочинской и Анапско-Геленджикской и практически полное отсутствие сейсмических проявлений в центральной «асейсмичной» области, разделяющей данные зоны [1; 3; 4; 6; 10].

В ходе проведенных сеймотектонических исследований в пределах Анапско-Геленджикского участка нами была составлена карта современной сейсмичности (рис. 1).

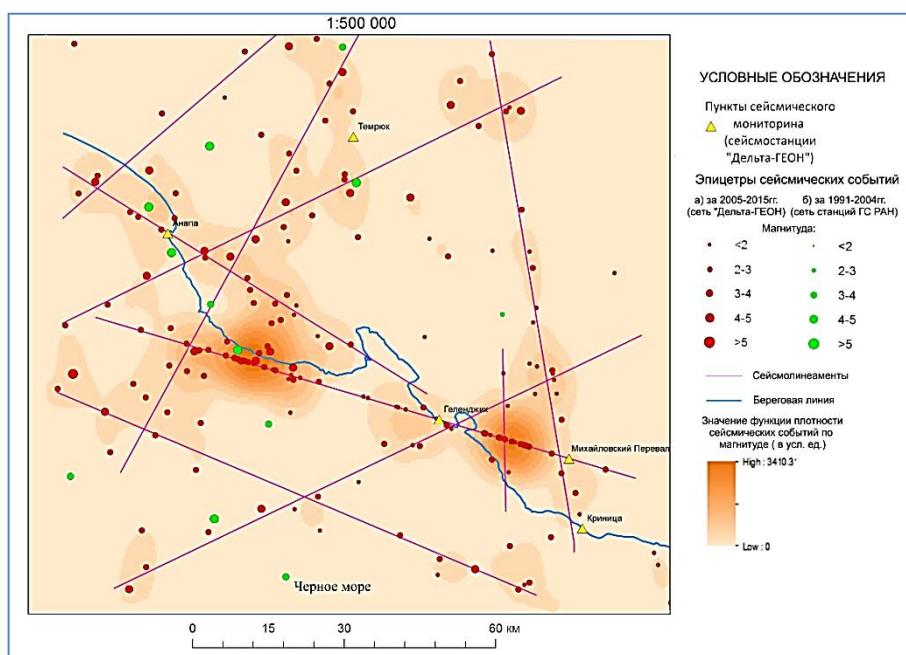


Рис. 1. Карта современной сейсмической активности Анапско-Геленджикского участка

При визуальном анализе полученной картины распределения сейсмических событий наблюдается группирование их эпицентров вдоль прямолинейных отрезков, которые справедливо будет назвать сейсмолинеаментами. Схожие линеаменты были выделены в качестве сейсмогенерирующих структур ещё Б. В. Сениным [9]. Участки пересечения линеаментов он выделял в качестве сейсмоактивных узлов – мест концентрации землетрясений с наибольшей интенсивностью и повторяемостью.

Тем не менее, полученные нами данные свидетельствуют о практически непрерывном распределении эпицентров сейсмических событий вдоль линеаментов. Участки, лежащие между линеаментами, являются практически асейсмичными. Анализ глубин возникновения очагов показал, что на одной линии непосредственно соседствуют друг с другом сейсмические события широкого диапазона глубин – от 0 до 90 км. Такое распределение сейсмических событий говорит о субвертикальном характере инициирующих их структур.

Для установления сейсмогенерирующих структур, обуславливающих, в частности, выделенные сейсмолинеаменты, были построены карты сопоставления современной сейсмичности с разрывными структурами новейшего и доновейшего заложения (рис. 2, 3).

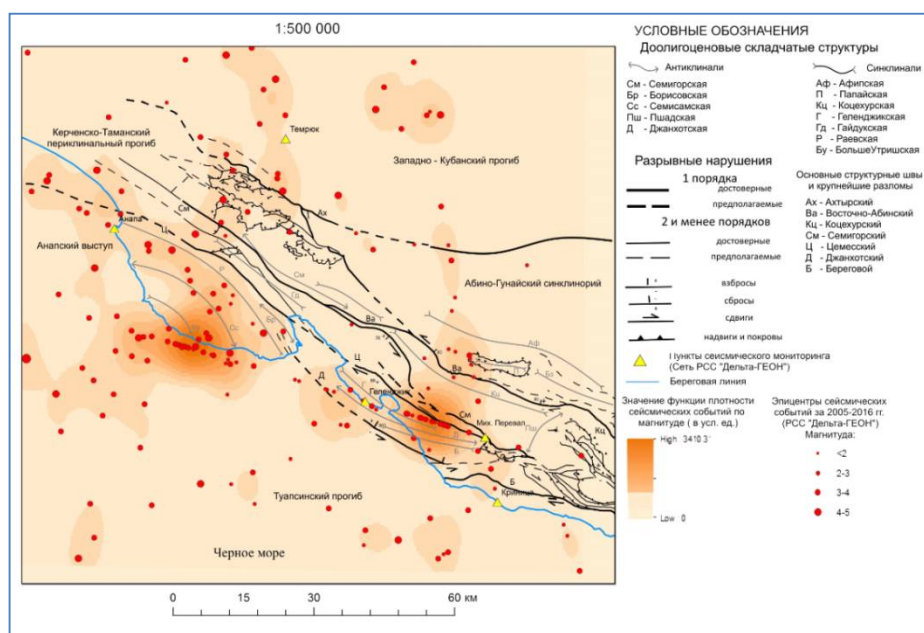


Рис. 2. Карта новейших сейсмогенерирующих структур Анапско-Геленджикского участка

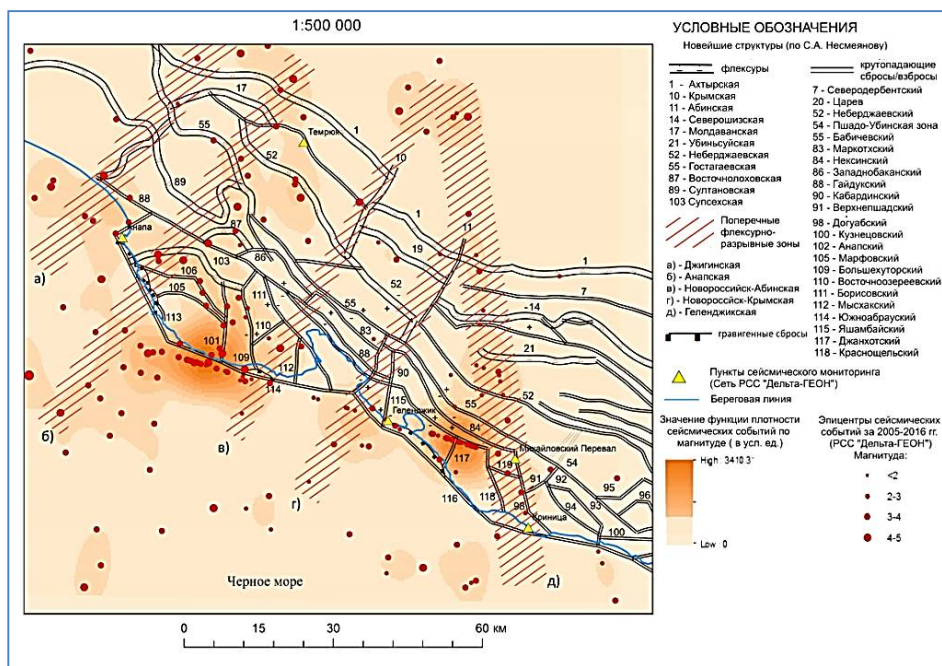


Рис. 3. Карта доновейших сейсмогенерирующих структур Анапско-Геленджикского

Было установлено, что дизъюнктивы позднегосинклинального структурного плана отличаются в настоящее время низкой сейсмической активностью, за исключением наиболее крупных Ахтырского и Восточно-Абинского разломов. Новейшие разрывы наоборот проявляют большую активность. Так, Криницко-Троицкий сейсмолинеament полностью попадает в Геленджикскую

поперечную флексурно-разрывную зону, в пределах которой также локализируются Догуабский и Краснощельский новейшие сбросы. Сейсмические события, приуроченные к данной зоне, принадлежат к низкому энергетическому классу и имеют среднюю магнитуду 2,3 в широком интервале глубин: от 0,8 до 90,2 км. Наблюдается повышенная плотность сейсмических проявлений, в особенности в местах пересечения данной зоны с Утришко-Геленджикским линеamentом и Ахтырской флексурно-разрывной зоной. Новороссийско-Крымская поперечная зона характеризуется умеренной сейсмической активностью ($M = 1,8-2,9$) плотность сейсмических проявлений на уровне фоновой. В пределах зоны локализируются многочисленные новейшие флексуры и разрывы антикавказской ориентировки: Кабардинский, Яшамбайский, Абинский. Наибольшей активностью отличаются Анапская и Джигинская поперечные зоны. Они характеризуются повышенной плотностью сейсмических проявлений и магнитудами в интервале от 2,1 до 4,3 (землетрясение 05.10.2007 г.). Новейшие структуры представлены здесь Анапской и Султановской флексурами. Природа Утришко-Геленджикского линеамента не ясна. Он образует два относительно самостоятельных участка сгущения сейсмособытий в районах полуострова Абрау и Толстого мыса. Первый характеризуется диапазоном магнитуд от 2,1 до 3,3, второй – от 1,7 до 2,3. Глубина очагов значительно варьирует. В плане данный линеament соответствует выделенному Е. Е. Милановским жёлобу Абрау [2].

По результатам линеamentного анализа космоснимков была составлена карта рельефообразующих линеamentов (рис. 4). Экспериментально было установлено, что для исследуемого Анапско-Геленджикского участка наибольшей информативностью (соответствие выделенных линеamentов элементам рельефа и тектоническим структурам при заданном уровне детализации) обладают прошедшие процедуру паншарпенинга снимки спектральных каналов ближнего инфракрасного диапазона (B5–B7) и дальнего инфракрасного диапазона (B10–B11). По заданным линеamentам был составлен растр их плотности, отражающий значение длины линеamentов на единицу площади карты ($\text{км}/\text{км}^2$). Полученная картина распределения плотностей позволяет выделить участки сгущения линеamentов вдоль Маркотхского хребта и вдольбереговых хребтов. Поперечные зоны и очаги активизации сейсмических процессов на данной карте не проявлены. Повышенная плотность в большей степени соответствует вертикальной и горизонтальной расчленённости рельефа, нежели тектоническим структурам.

Результаты выявления закономерностей в распределении сейсмических событий и выделения зон ВОЗ. В ходе исследований пространственно-статистических закономерностей были рассчитаны индекс среднего ближайшего соседства, общие индексы Морана и Геттиса – Орда для значений магнитуды и глубины. Результат анализа среднего ближайшего соседства по эпицентрам сейсмических событий показал значение Z-оценки, равное $-3,654$ от величины стандартного отклонения, что говорит о вероятности случайного распределения точек, составляющей менее 1 %. Таким образом, в распределении эпицентров сейсмических событий на данной территории наблюдается ярко выраженная кластеризация.

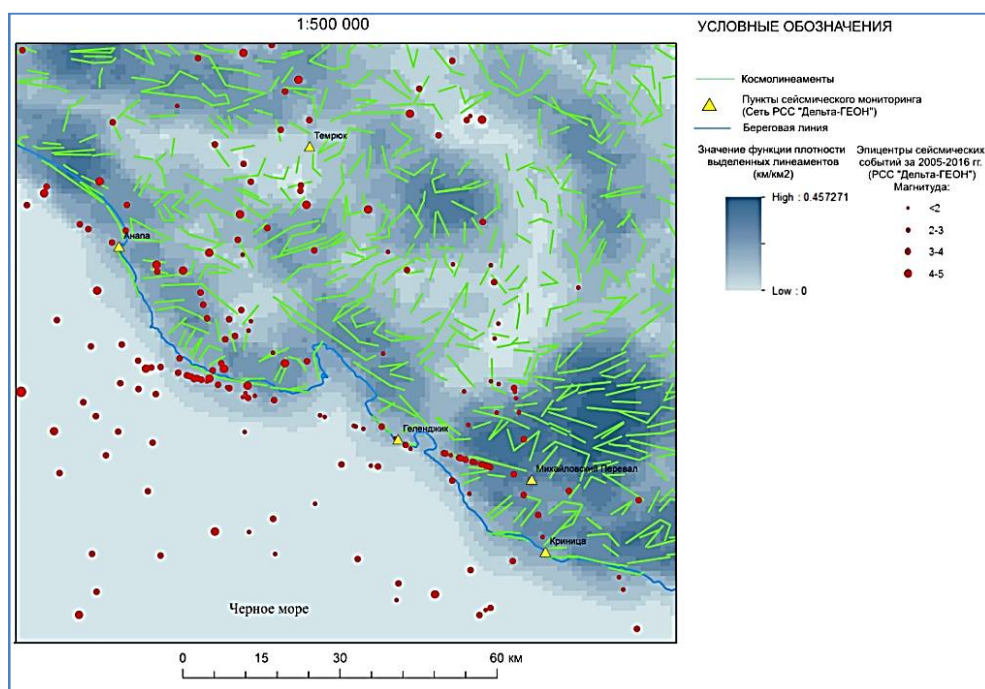


Рис. 4. Карта рельефообразующих линеаментов Анапско-Геленджикского участка

Общий индекс Морана, рассчитанный по магнитуде составляет 0,204 и характеризуется Z-оценкой 12,74, что говорит об однозначной зависимости между магнитудой событий и степенью их кластеризации. Индекс Геттиса – Орда равен 0,16 при значении Z-оценки –1,81 и уровне значимости (p-значение) 0,06, что говорит о кластеризации в пределах исследуемого участка сейсмособытий с низкими значениями магнитуд.

Общий индекс Морана, рассчитанный по глубине очага, составляет 0,078 при значении Z-оценки, равном 5,15, что указывает на общую кластеризацию сейсмособытий с близкими значениями глубин. Однако значение индекса Геттиса – Орда, равное 0,188, при значении Z-оценки 1,63 и уровне значимости, равном 0,1, говорит о случайном распределении сейсмособытий по глубине. Таким образом, в рамках кластера, каким, к примеру, может являться сейсмолинеament, наблюдается близкое соседство сейсмособытий со значительной разницей глубин, о чем упоминалось выше.

По результатам пространственной статистики была построена карта «горячих и холодных точек», очагов сейсмических событий, обладающих повышенными или пониженными значениями магнитуд, относительно их окрестности (рис. 5).

Визуальный анализ данной карты позволяет заметить увеличение интенсивности сейсмической активности с востока на запад, от г. Геленджика к г. Анапе. Наиболее высокие значения получены в районах г. Анапы, г. Темрюк и пос. Троицкого, что даёт основания выделять их в качестве сейсмоактивных узлов. Также следует отметить концентрацию сейсмических событий низкого энергетического класса, расположенную восточнее г. Геленджика.

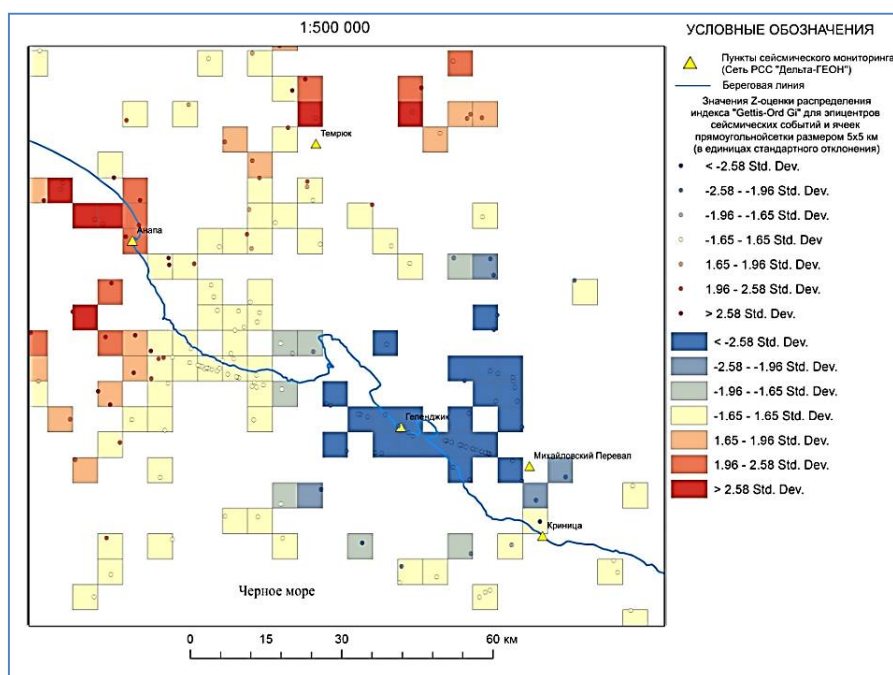


Рис. 5. Карта «горячих и холодных точек» Анапско-Геленджикского участка

Выводы. Построение пространственно-статистических моделей по различным критериям позволило установить кластеризацию сейсмических событий Анапско-Геленджикского участка по значению магнитуд, причём установлена кластеризация точек с низкими значениями. Данные кластеры соответствуют в большей степени линейным сейсмогенерирующим структурам, а не морфоузлам.

Полученные результаты могут послужить основой для опережающих инженерно-геотектонических исследований при детальном сейсмическом районировании, планировании территорий и градостроительстве, а также проведении инженерно-геологических изысканий под объекты повышенного уровня ответственности.

Список литературы

1. Ананьин, И. В. Сейсмичность Северного Кавказа / И. В. Ананьин. – Москва : Наука, 1977. – 149 с.
2. Милановский, Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа / Е. Е. Милановский. – Москва : Недра, 1968. – 437 с.
3. Несмеянов, С. А. Инженерная геотектоника / С. А. Несмеянов. – Москва : Наука, 2004. – 780 с.
4. Овсяченко, А. Н. Сеймотектоника и элементы современной геодинамики Северо-Западного Кавказа по данным палеосейсмогеологических исследований / А. Н. Овсяченко. – Москва : ИФЗ РАН, 2006. – 173 с.
5. Островский, А. Б. Палеосеймотектонические дислокации на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа в связи с оценкой современной сейсмической опасности этой территории / А. Б. Островский // Комплексные исследования Черноморской впадины. – Москва : Наука, 1970. – С. 46–58.
6. Отчёт по подготовке к изданию листов L-37-XIX, XXV, XXXIII, XXIV Госгеолкарты РФ масштаба 1 : 200 000 / ФГУП Кавказгеолсъёмка; рук. С. Г. Корсаков; исполн.: С. Г. Корсаков, И. Н. Семенуха, В. М. Андреев. – Ессентуки, 2002. – 374 с.

7. Осуществление государственного мониторинга состояния геологической среды прибрежно-шельфовой зоны Азово-Черноморского и Каспийского бассейнов РФ : отчёт по государственному контракту от 07.06.2008 № 28/01/60-2 / ГИЦ ФГУГП Южморгеология ; отв. исп. В. Н. Шендеров. – Геленджик, 2010. – Т. 1. – 232 с.

8. Попков, В. И. Результаты изучения палеосейсмостектонических деформаций и оползневых процессов на территории государственного природного заповедника «Утриш» (Северо-Западный Кавказ) / В. И. Попков, О. Ю. Крицкая, А. А. Остапенко, О. Н. Быхалова // Геология, география и глобальная энергия. – 2015. – № 4. – С. 47–58.

9. Сенин, Б. В. Тектогенез как возможный синергетический прогресс / Б. В. Сенин // Системный подход в геологии (тектонические и прикладные аспекты). – Москва : МИНГ, 1989. – С. 12–13.

10. Хромовских, В. С. Палеосейсмогеология Большого Кавказа / В. С. Хромовских, В. П. Солоненко, Р. М. Семенов, В. М. Жилкин. – Москва : Наука, 1979. – 188 с.

References

1. Ananyin, I. V. *Seysmichnost Severnogo Kavkaza* [Seismicity of the North Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 149 p.

2. Milanovsky, Ye. Ye. *Noveyshaya tektonika Kavkaza* [The newest tectonics of the Caucasus]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 437 p.

3. Nesmeyanov, S. A. *Inzhenernaya geotektonika* [Engineering geotectonics]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 780 p.

4. Ovsyuchenko, A. N. *Seysmotektonika i elementy sovremennoy geodinamiki Severo-Zapadnogo Kavkaza po dannym paleoseysmogeologicheskikh issledovaniy* [Seismotectonics and elements of modern geodynamics of the Northwest Caucasus by data paleoseysmogeologicheskikh researches]. Moscow, IFZ RAS Publ., 2006, 173 p.

5. Ostrovsky, A. B. Paleoseysmotektonicheskie dislokatsii na Chernomorskom poberezhie Severo-Zapadnogo Kavkaza v svyazi s otsenkoy sovremennoy seysmicheskoy opasnosti etoy territorii [Paleoseysmotektonicheskiye of dislocation on the Black Sea coast of the Northwest Caucasus in connection with assessment of modern seismic hazard of this territory]. *Kompleksnye issledovaniya Chernomorskoj vpadiny* [Complex researches of the Black Sea hollow]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 46–58.

6. Korsakov, S. G., Korsakov, S. G., Semenukh, I. N., Andreyev, V. M. *Report on preparation for the edition of the sheets L-37-XIX, XXV, XXXIII, XXIV of Gosgeol'karta of the Russian Federation of scale 1:200.000*. Yessentuki, 2002, 374 p.

7. Shenderov, V. N. *Implementation of the state monitoring of a condition of the geological environment of a coastal and shelf zone of Azovo-Chernomorsky and Caspian basins Russian Federation/report on the government contract of 07.06.2008 No. 28/01/60-2*. Gelendzhik, 2010, vol. 1, 232 p.

8. Popkov, V. I. Kritskaya, O. Yu., Ostapenko, A. A., Bykhalova, O. N. Rezultaty izucheniya paleoseysmotektonicheskikh deformatsiy i opolznevyykh protsessov na territorii gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Utrish" (Severo-Zapadnyy Kavkaz) [Results of studying the paleoseysmotektonicheskikh of deformations and landslide processes in the territory of the national Utrish nature reserve (the Northwest Caucasus)]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2015, no. 4, pp. 47–58.

9. Xining B.V. Tektogenez kak vozmozhnyy sinenergeticheskiy progress [Tektogenez as possible sinenergeticheskiy progress]. *Sistemnyy podkhod v geologii (tektonicheskie i prikladnye aspekty)* [System approach in geology (tectonic and applied aspects)]. Moscow, MING Publ., 1989, pp. 12–13.

10. Khromovskikh, V. S., Solonenko, V. P., Semenov, R. M., Zhilkin V. M. *Paleoseysmogeologiya Bolshogo Kavkaza* [Paleoseysmogeologiya of Greater Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 188 p.