

Рис. 8. Сравнение годографа Джеффриса-Буллена [3] волны Релея (1) и обобщенного годографа, построенного по экспериментальным данным для ВКМ (2)

Резюмируя изложенное, необходимо отметить, что особенности записи релеевских волн являются в условиях ВКМ надежным критерием распознавания техногенных и тектонических событий на сейсмических записях. Волны Релея, сгенерированные карьерными взрывами, несут информацию о скоростных неоднородностях верхней части кристаллического фундамента. Региональный годограф этой волны должен использоваться при обработке записей местных сейсмических событий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Надежка, Л.И. Землетрясение 31 марта 2000 г. в восточной части Воронежского кристаллического массива по данным группы сейсмостанций «Воронеж» / Л.И. Надежка, И.Н. Сафронич, И.П. Габсатарова // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных территорий : материалы междунар. конференции. – Воронеж, 2001. – С. 140–146.
2. Дубянский, А.И. Региональные скоростные модели ВКМ / А.И. Дубянский, К.Ю. Силкин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – Воронеж, 2003. – № 2. – С. 186–190.
3. Рихтер, Ч. Элементарная сейсмология / Ч. Рихтер. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 670 с.

УДК 550.831

## СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ НА САРАТОВСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ С СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ АЛЬПИЙСКО-СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО ПОЯСА И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ЧАСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛИТЫ\*

В.А. Огаджанов<sup>1</sup>, Ю.П. Конценебин<sup>2</sup>, А.А. Назаров<sup>1</sup>, А.В. Огаджанов<sup>2</sup>, С.В. Соломин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики.

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского

Ранее нами [9,12] было указано на связь сейсмической активности восточных частей Европейской плиты и Альпийско-Средиземноморского пояса. Геодинамика восточной части Альпийско-Средиземноморского сейсмогенного пояса обусловлена давлением Аравийской плиты. Откуда следует, что напряжения, формируемые в пределах юго-востока Европейской плиты и обусловленные ими изменения геофизических полей в свою очередь могут быть зависимы от геодинамики восточной части Альпийско-Средиземноморского пояса в целом (рис. 1).

Отражение динамики литосферы указанного региона в гравитационном поле наглядно иллюстрируется материалами наблюдений за изменениями силы тяжести ( $\Delta g$ ) во времени на Саратовском геодинамическом

полигоне (СГП). На СГП наблюдения за изменениями гравитационного поля во времени проводятся начиная с 1999 года. Задача этих измерений – исследование связей временных вариаций гравитационного поля с сейсмичностью. С этой целью на пунктах полигона периодически проводятся измерения вертикальной составляющей поля  $\Delta g$ . Измерения ведутся на 8 пунктах полигона с периодичностью один раз в 3–6 месяцев. Наблюдения выполнялись гравиметром, имеющим инструментальную погрешность  $\pm 0,08$  мГал и цену деления – 7,73 мГал / оборот. Опорная сеть отработана по системе замкнутых полигонов для учета смещения нуля-пункта гравиметра и оцифровки (передачи абсолютных значений силы тяжести) в условном уровне на пункты наблюдений. Учитывая достаточную стабильность нуля-пункта, позволяющую принять общий линейный нуль-пункт для всего рейса, была принята данная система наблюдений.

\*Статья печатается в дискуссионном порядке.

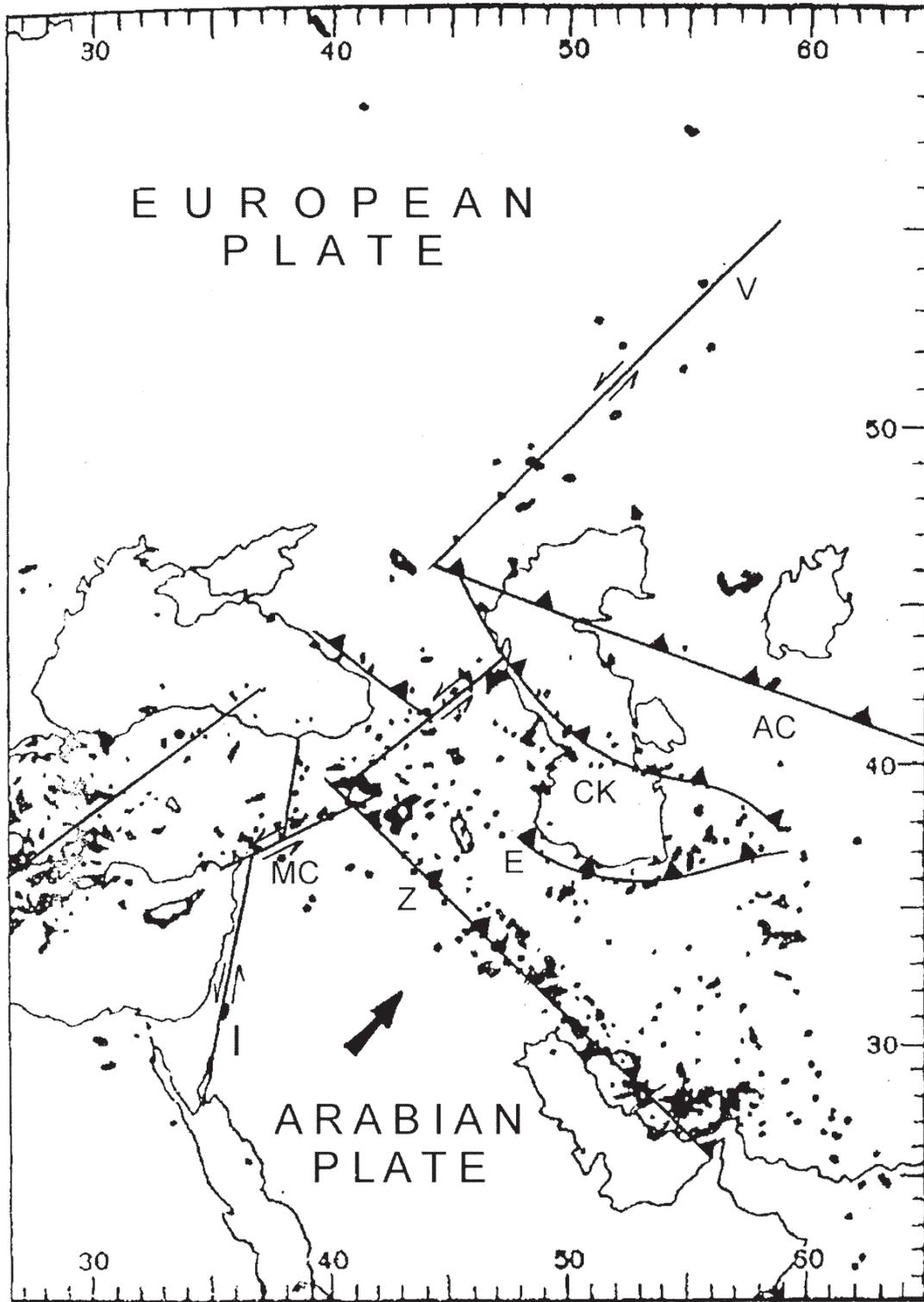


Fig. 2

Рис. 1. Связь главных геодинамических систем востока Европейской плиты и Альпийско-Средиземноморского пояса:

1-структуры сжатия:

Z – Загорская, E – Эльбурская, CK – Кавказ-Копетдагская, AC – Арало-Каспийская;

2 – линии сдвиговых деформаций:

I – Иорданская, MC – Средиземноморско-Каспийская, V – Волжская; рассеянная сейсмичность за период 1961–1965 гг., по Беркхемеру и Пуаркару (1984). Стрелкой показано направление давления Аравийской плиты

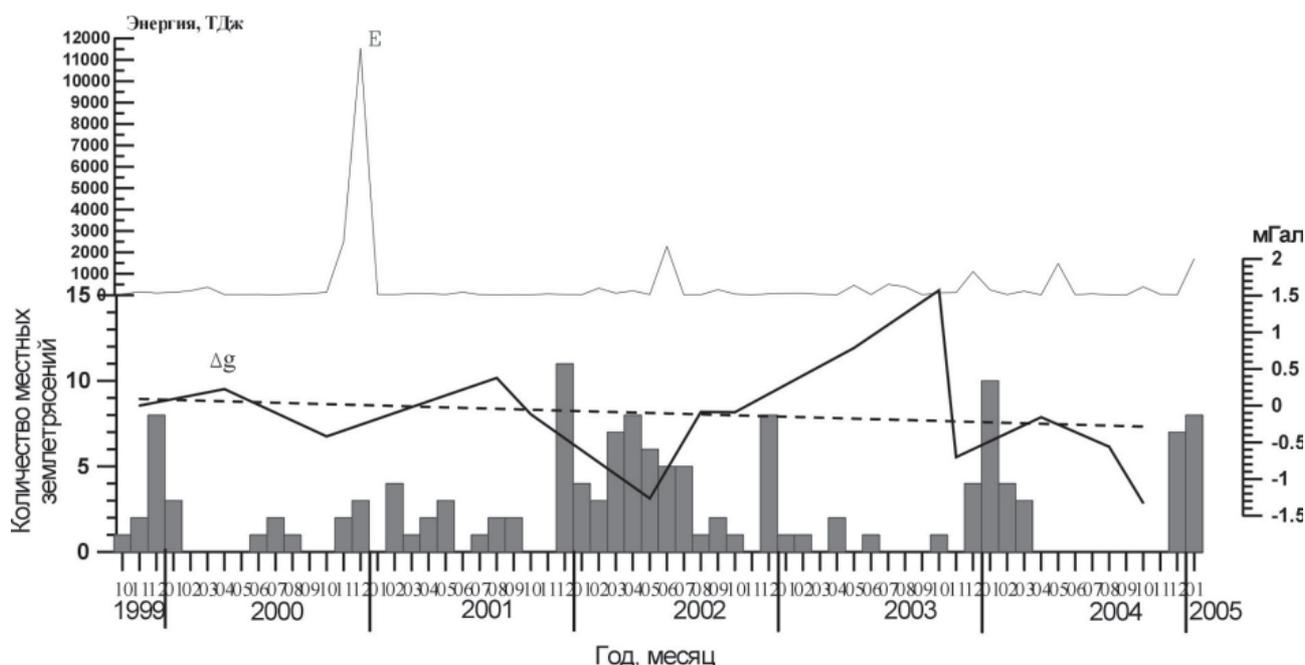


Рис. 2. Сопоставление изменений гравитационного поля ( $\Delta g$ ) на Саратовском геодинимическом полигоне с суммарной энергией землетрясений восточной части Альпийско-Средиземноморского пояса (E) и динамикой изменения локальной сейсмичности

Значения  $\Delta g$  вычисляются в условной системе единиц произвольного уровня и цены деления с учетом поправки за сползание нуля-пункта.

В результате измерений на различных пунктах полигона выявлены различные по знаку и скорости изменения гравитационного поля во времени. На одних пунктах полигона в одни и те же периоды времени отмечалась тенденция к увеличению значений  $\Delta g$ , на других – к ее понижению. Наиболее общие закономерности временных вариаций гравитационного поля для СГП со всей очевидностью выявились после вычисления их средних значений из N-го числа пунктов для отдельных периодов наблюдений. Средние значения для каждого периода вычислялись по формуле:

$$\Delta g_{cp} = (\Delta g_1 + \Delta g_2 + \Delta g_3 + \dots + \Delta g_N) / N, \quad (1)$$

где  $\Delta g_{cp}$  – среднее значение изменений силы тяжести для всего полигона,  $\Delta g_1 \dots \Delta g_N$  – изменения силы тяжести на каждом пункте.

В вариациях средних значений гравитационного поля по полигону выявляются относительные увеличения и уменьшения значений  $\Delta g_{cp}$  относительно тренда его изменения во времени (рис. 2). Тренд гравитационного поля с октября 1999 по май 2004 года имел устойчивую тенденцию роста примерно на 0,06 мГал/год. Согласно данным, приведенным в работе [2], в некоторых районах Поволжья вековой ход гравитационного поля может достигать 0,18 мГал/год. Наблюдаемое на СГП увеличение силы тяжести согласуется с представлениями о нарастающих напряжениях сжатия в пределах юго-восточной части Европейской плиты под воздействием давлений, передаваемых на северо-восток Кавказским и

на запад – Уральским мегаблоками [9]. Кавказский мегаблок является передним фронтом сжатия восточной части Альпийско-Средиземноморского пояса. Отсюда следует, что увеличения значений  $\Delta g$ , находящиеся в соответствии с трендом изменения во времени, отражают нарастающие напряжения в пределах восточной части Альпийско-Средиземноморского пояса.

На рисунке 2 показано сопоставление суммарной энергии землетрясений, произошедших в восточной части Альпийско-Средиземноморского пояса с количеством местных землетрясений и изменениями гравитационного поля в районе СГП. Вычисления суммарной энергии землетрясений проводились в регионе, ограниченном координатами 25–45°N и 20–60°E. Пикообразные скачки суммарной энергии землетрясений в отдельные периоды времени относительно ее фоновых значений, как правило, соответствуют возникновению землетрясений магнитудой более 6. Местная сейсмическая активность характеризуется динамикой проявлений землетрясений магнитудой не более 3,5 в радиусе до двухсот км от центра СГП.

Отклонения вариаций силы тяжести на СГП от тренда ее изменения во времени в пределах различных интервалов времени в область максимальных и минимальных значений определяют, очевидно, различие в изменениях напряженно-деформированного состояния и плотности литосферы [5]. В частности, понижение гравитационного поля с апреля по октябрь 2000 г. может быть следствием разуплотнения литосферы региона в это время. В ноябре – декабре 2000 г. в бассейне Каспийского моря произошло три сильных землетрясения с магнитудами 6,2, 6,3 и 7,4, после чего началось увеличение  $\Delta g$  [11]. Другой период аномально

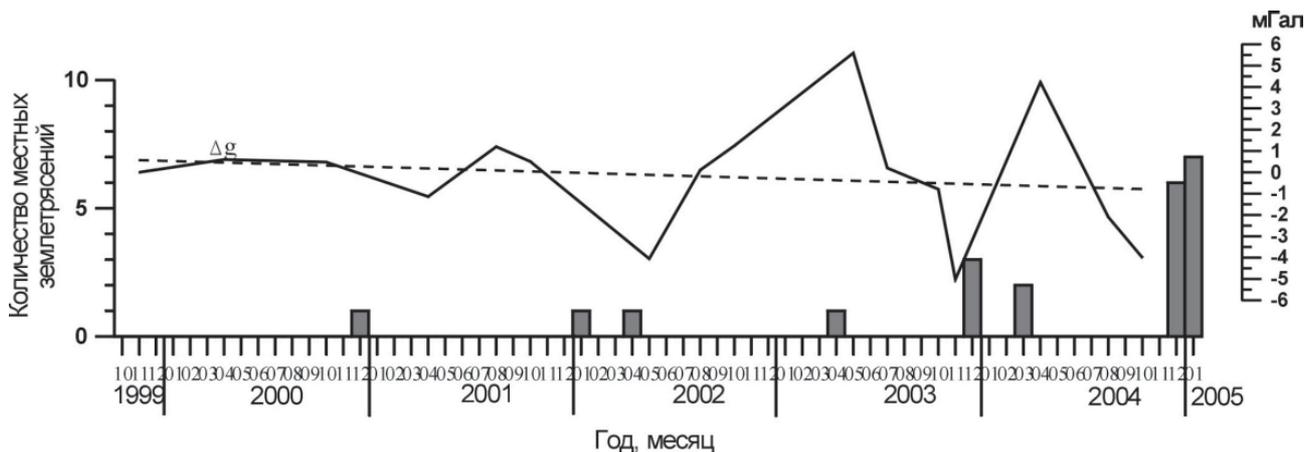


Рис. 3. Сопоставление изменений гравитационного поля ( $\Delta g$ ) на пункте Талалихино с количеством землетрясений в пределах Талалихинского сейсмоактивного блока

интенсивного понижения  $\Delta g$  зафиксирован в период с августа 2001 г по май 2002 г.; в декабре 2001 г. было отмечено усиление местной сейсмической активности, которое продолжалось вплоть до июля 2002 года. С периодом усиления местной сейсмической активности совпало землетрясение в северо-западном Иране (июнь 2002 г.) магнитудой 7. Этому периоду усиления сейсмической активности Волго-Каспийского региона соответствует одно из наиболее сильных понижений  $\Delta g$  относительно тренда изменения во времени (рис. 2). Период с августа 2002 года по ноябрь 2003 года характеризуется как сравнительно спокойный в сейсмическом отношении. Увеличение  $\Delta g$  можно рассматривать как следствие уплотнения и накопления напряжений в литосфере региона под воздействием деформаций сжатия, обусловленных передачей давления со стороны переднего фронта сжатия Альпийского пояса. Смена знака изменения гравитационного поля в сторону понижения произошла в ноябре 2003 года. Это понижение соответствует периоду усиления как местной сейсмичности, начавшемуся в декабре 2003 года, так и периоду возникновения двух сильных землетрясений магнитудой 6,4 и 6,5, произошедших в декабре 2003 г. и мае 2004 г. соответственно; эти землетрясения произошли южнее Каспийского моря в горно-складчатых областях Ирана. Наиболее интенсивное понижение гравитационного поля отмечается начиная с августа 2004 года. Понижение настолько сильно, что привело к изменению общей тенденции тренда изменения  $\Delta g$  во времени с возрастания на понижение. Такое понижение вполне могло явиться отражением процессов планетарного масштаба, с которыми может быть связана и подготовка сильнейшего из всех известных на сегодняшний день землетрясений в районе острова Суматра магнитудой 9,0, произошедшего 26 декабря 2004 года. Свойство предвестников землетрясений магнитудой более 8 проявляться на расстояниях в тысячи километров не входит в противоречие с процессами подготовки катастрофических землетрясений с позиций рассмотрения литосферы Земли как единой геодинамической системы, изменение напря-

женно-деформированного состояния в одной точке которой приводит к перераспределению напряжений во всей системе [6]. Дальность проявления предвестников зависит от энергии готовящегося землетрясения и степени сопряженности участков, в пределах которых наблюдаются предвестники с очаговыми зонами землетрясений. Условиями, благоприятствующими дальности проявления предвестников, является связь очаговых зон землетрясений с пунктами наблюдений предвестников линиями региональных деформаций. В этой связи сопряженность системы Волго-Камских региональных разломов с основными сейсмогенными поясами Земли [7] может объяснить способность вариаций геофизических полей на территории Поволжья реагировать на подготовку сильных землетрясений на больших расстояниях от очага.

Анализируя причины соответствий между изменениями гравитационного поля и сейсмичностью на качественном уровне, отметим, что условиями, благоприятными для возникновения землетрясений, являются деформации сжатия горных пород, сжатие сопровождается уплотнением и, как следствие, увеличением  $\Delta g$ . Согласно дилатансионной модели очага землетрясений период сжатия горной породы завершается сколовыми деформациями с возникновением трещин [10]. Заполнение трещин флюидами определяет начало процесса разуплотнения, что сопровождается понижением гравитационного поля. Разуплотнение в свою очередь может привести к потере устойчивости комплексов литосферы, и как следствие, сейсмичности. Растяжение и сжатие (разуплотнение – уплотнение) в земной коре, литосфере и Земле в целом носят характер глобальной закономерности, о чем нами подробно было сказано ранее [8]. Очевидно, что эта закономерность отражается и в отмеченной выше связи между изменениями гравитационного поля и проявлениями сейсмичности. Другими словами, связью периодов усиления сейсмической активности с динамикой разуплотнения литосферы вполне можно объяснить соответствие периодов усиления сейсмической активности и понижений гравитационного поля на качественном уровне.

Для количественных оценок вероятных изменений гравитационного поля рассмотрим модель литосферы Волго-Каспийского региона. Согласно этой модели изменения гравитационного поля на СГП возникают под воздействием деформаций в пределах восточной части Альпийско-Средиземноморского пояса (рис. 2), следовательно, горизонтальные размеры зоны деформации могут достигать 2000 км и более. Деформации, приводящие к возникновению очагов землетрясений, происходят в интервале глубин литосферы 0–60 км. Этот интервал соответствует фактическим данным о распределении очагов землетрясений в литосфере региона. Таким образом, деформируемый слой литосферы, оказывающий влияние на изменения гравитационного поля на СГП, может быть принят в качестве бесконечного, имеющего толщину 60 км. Оценки вариаций плотности ( $\Delta\sigma$ ), соответствующие изменениям гравитационного поля ( $\Delta g_{cp}$ ) на СГП, проведены по формуле

$$\Delta\sigma = \Delta g_{cp} / 0,0419H, \quad (2)$$

где  $H$  – мощность литосферы, равная 60000 м.

Оценки показывают, что при такой модели изменениям гравитационного поля до 2 мГал в объемах литосферы линейными размерами от 200 до первых тысяч километров средние значения изменения плотности равны  $0,0008 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Большими вариации плотности могут быть в сейсмоактивных блоках, ограниченных по простиранию. Примером может служить Талалихинский сейсмоактивный блок. Блок назван по одноименному пункту повторных гравиметрических наблюдений «Талалихино», расположенному в его центре. В пределах этого блока за период с октября 1999 по январь 2005 года зарегистрировано 24 землетрясения магнитудой от 0,6 до 3,1. Эпицентры этих землетрясений распределены по площади  $900 \text{ км}^2$ . Интервал глубин размещения очагов землетрясений 0–15 км. На пункте «Талалихино» отмечены наибольшие из всех остальных пунктов СГП амплитуды вариаций  $\Delta g$  в течение относительно коротких промежутков времени (рис. 3). Как видно из рисунка 3, практически все минимумы вариаций  $\Delta g$  совпадают с периодами усиления сейсмической активности Талалихинского блока, а наибольшее понижение силы тяжести, за период с августа по октябрь 2004 г., предшествует зимнему периоду усиления сейсмической активности 2004–2005 гг. Оценка вариаций плотности рассматриваемого сейсмоактивного блока, соответствующая изменениям гравитационного поля в пункте Талалихино, была проведена по формуле для прямоугольного параллелепипеда [2, 4].

Расчеты показали, что вариации плотности в объеме Талалихинского сейсмоактивного блока за весь период наблюдений, с октября 1999 г. по октябрь 2004 г., составили  $0,0003\text{--}0,0013 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ . То есть, как видно из расчетов, временные вариации гравитационного поля

амплитудой в несколько мГал могут быть объяснены даже крайне незначительными изменениями плотности больших объемов литосферы. Подобные вариации плотности вполне могут иметь место при изменениях напряженно-деформированного состояния литосферы.

Итак, очевидна закономерная связь изменений гравитационного поля во времени, наблюдаемых на востоке Европейской плиты, с сейсмической активностью, заключающаяся в совпадении периодов понижения  $\Delta g$ , с увеличением количества местных и удаленных землетрясений. Указанные материалы создают надежную фактологическую основу для разработки методов прогноза землетрясений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беркхемер, Х. Потенциальная сейсмичность района центрального и восточного Средиземноморья / Х. Беркхемер, Г. Пуаркару // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий : доклады 27 междунар. конгресса. Москва, 4–14 сентября 1984 г. – С. 43–55.
2. Вольвовский, Б.С. Краткий справочник по полевой геофизике / Б.С. Вольвовский, Н.Я. Кунин, Е.И. Терехин. – М. : Недра, 1977. – 300 с.
3. Воробьев, В.Я. Связь геодинамики и напряженного состояния земной коры Восточно-Европейской платформы с нефтегазоносностью: Геофизика / В.Я. Воробьев, В.А. Огаджанов, С.В. Соломин. – 1999. – № 4. – С. 52–55.
4. Гравиразведка. Справочник геофизика / под ред. Е.А. Мудрецов. – М. : Недра, 1987. – 397 с.
5. Конценебин, Ю.П. Результаты повторных гравиметрических наблюдений на Саратовском геодинамическом полигоне : тезисы докладов четвертых геофизических чтений им. В.В. Федынского / Конценебин Ю.П., Огаджанов В.А., Огаджанов А.В. – Москва : Геон, 2002. – С 81–82.
6. Моргунов, В.А. Реальности прогноза землетрясений / В.А. Моргунов // Физика Земли, 1999. – № 1. – С.79–91.
7. Огаджанов, В.А. Сейсмичность Поволжья и перспективы ее изучения / В.А. Огаджанов, В.В. Тикшаев // Недра Поволжья и Прикаспия. – Вып. 3. – 1992. – С. 58–64.
8. Огаджанов, В.А. Концепция геофизических исследований, основанная на явлении дилатации горных пород / В.А. Огаджанов. – Геофизика, 1998. – № 4. – С 10–13.
9. Огаджанов, В.А. Использование данных глубинных исследований для прогноза зон высокого сейсмического потенциала платформенных территорий / В.А. Огаджанов // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2003. – Вып. 35. – С. 32–39.
10. Шарма, П. Геофизические методы в региональной геологии / П. Шарма. – М. : Мир, 1989. – 487 с.
11. Kontsenebin, Y.P. The relation between the gravity field variations and the earthquakes within the Volga – Caspian region / Y.P. Kontsenebin, A.V. Ogadzhonov // European seismological commission. XXVIII General Assambly. Abstracts. Genova. Italy, September, 2002.
12. Ogadzanov, V.A. The relation between seismicity of the alpine-Mediterranean belt and seismicity of the eastern party of the European plate. European seismological comission, XXIX General Assambly. Abscracs / V.A. Ogadzanov. – Potsdam. September, 2004.