

Л. Н. Петрова, В. В. Карпинский, Е. Г. Орлов

ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМЛИ И СИЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Систематические исследования сверхдлиннопериодных колебаний Земли с периодами более 1 ч, названных сейсмогравитационными колебаниями, были начаты в нашем городе в 70-х годах по инициативе Е. М. Линькова (†). Анализ наблюдений, выполненных с помощью помехозащищенного длиннопериодного сейсмометра [1, 2], привел к заключению о планетарном характере этих колебаний и устойчивой в статистическом смысле структуре их спектра в диапазоне периодов от 1 до 5 ч [3, 6]. Исследуемые сверхдлиннопериодные колебания имеют переменную во времени интенсивность [5, 7] и отличительные особенности. При относительно низкой сейсмической активности Земли, когда не возникает землетрясений с магнитудами $M > 6,5$, в спектрах колебаний наблюдаются интенсивные составляющие, периоды которых близки к модам собственных колебаний Земли [7]. Это относится и к самой низкой моде, обычно наблюдаемой только после очень сильных землетрясений, — колебанию со средним периодом 54 мин. Для указанного колебания выявлено предсказанное в [8] расщепление на пять линий, возникающее из-за вращения Земли [7].

Во временных записях исследуемых сейсмогравитационных колебаний обнаружены динамические феномены — резкие знакопеременные изменения амплитуды колебаний, превышающие фоновый уровень в 2,5–3 раза. Они названы пульсациями и имеют продолжительность 5–20 ч. Анализ показал, что появление их перед сильными землетрясениями неслучайно с вероятностью 0,95 [9]. При сравнении спектрально-временных диаграмм длиннопериодных сейсмических колебаний, зарегистрированных в Петербурге и Обнинске, обнаружены общие черты в динамике процессов [10]. Колебания с периодами 1–5 ч позднее были зарегистрированы также немаятниковыми приборами. С помощью лазерных интерферометров они зарегистрированы в удаленных друг от друга пунктах: Крым, Кавказ, Владивосток [11–13]. Вышедшая в 1995 г. работа [14] фактически подтвердила установленную нами структуру спектра сейсмогравитационных колебаний Земли. При этом следует отметить, что авторы [14], выявив в низкочастотном спектре неслучайные составляющие с высокой достоверной вероятностью 0,99, приводят этот спектр как побочный результат исследований, по-видимому, не считая колебания в диапазоне периодов 1–5 ч информативными для целей геофизики.

Результаты систематических исследований сейсмогравитационных колебаний Земли, проводимых на кафедре физики Земли Санкт-Петербургского университета, дают основания полагать, что указанный диапазон спектра колебаний Земли обладает определенными информационными характеристиками. Выявление этих характеристик, их анализ и правильная интерпретация — важнейшая задача исследований.

Аппаратура и характеристика сейсмических наблюдений

Несмотря на определенные успехи, область супернизких частот, расположенная между собственными и приливными колебаниями Земли, остается наименее изученной в общем спектре колебаний планеты. Это обстоятельство объясняется рядом объективных трудностей, возникающих из-за влияния различных помех при обеспе-

чении достаточной устойчивости маятников и одновременно — высокого увеличения регистрирующих каналов в этом диапазоне. Многолетние работы, направленные на обеспечение уверенной регистрации столь низкочастотных колебаний, привели к созданию сейсмогравиметрического комплекса, предназначенного для работы в области периодов 0,5–5 ч [15].

Сейсмогравиметрический комплекс (СГК) состоит из супердлиннопериодных каналов: вертикального, работающего в режиме сейсмогравиметра, двух горизонтальных сейсмометров и микробарографического канала для регистрации вариаций возмущения атмосферы. Сейсмометры имеют специальную защиту от основных помехообразующих факторов. Вертикальный маятник помещен в термобарокамеру, снижающую на порядок влияние баровариаций в рабочей полосе частот и обеспечивающую ослабление температурных вариаций на два порядка [1]. Горизонтальные маятники установлены на антинаклонную платформу, существенно уменьшающую влияние как местных локальных, так и приливных наклонов [16]. Для защиты от конвективных потоков платформа оснащена специальным кожухом. Устойчивость нуля вертикального маятника обеспечивается введением отрицательной обратной связи по смещению. Все каналы имеют идентичные блоки фильтров с полосой пропускания, соответствующей исследуемому диапазону частот.

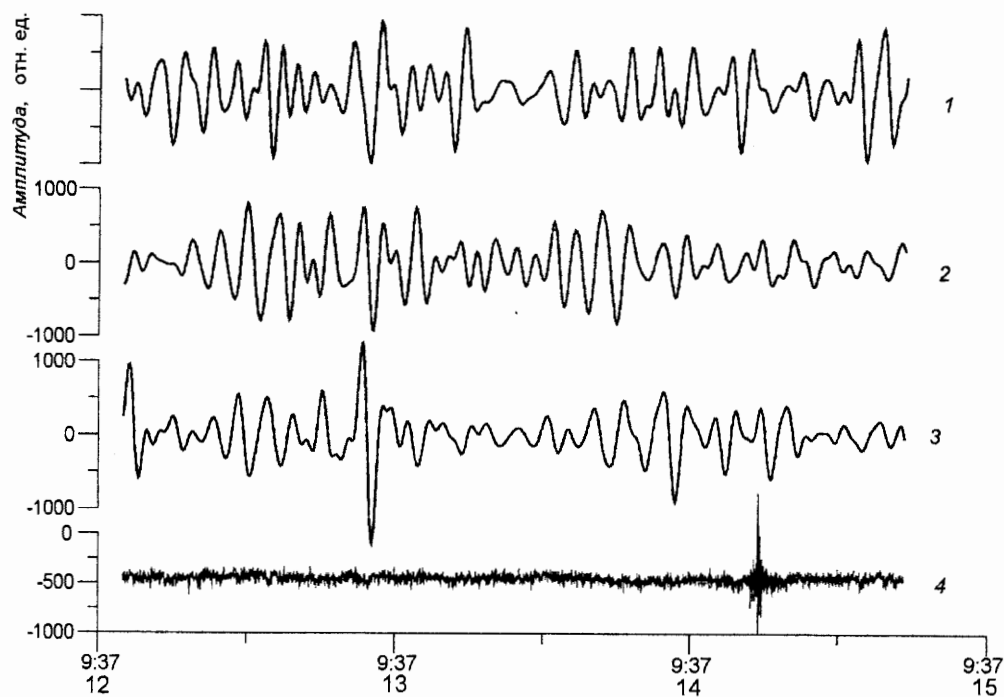


Рис. 1. Фрагменты сейсмограмм. Сентябрь 1995 г.

1 — Z-компонента; 2 — E-W-компонента; 3 — N-S-компонента; 4 — колебания на выходе фотоэлектрического преобразователя (до блока фильтров).

При собственных периодах маятников 12–13 с регистрируемый кинематический элемент в исследуемой полосе периодов соответствует ускорению, испытываемому основанием прибора при его смещении под действием колебаний почвы. Вертикаль-

ные маятники испытывают дополнительно воздействие возмущений силы тяжести, которые сопровождают эти колебания, т. е. работают как сейсмогравиметры. На периоде 1 ч воздействие на вертикальный маятник инерциального и гравитационного ускорений примерно равны. В связи с этим для колебаний с периодами 1–5 ч и был введен термин “сейсмогравитационные” колебания Земли [9].

Фрагмент записей, полученных с помощью сейсмогравитационного комплекса в сентябре 1995 г., приведен на рис. 1. Землетрясение, отчетливо зарегистрированное на выходе фотоэлектрического преобразователя (кривая 4), произошло 14 сентября в 14 ч 04 мин вблизи побережья Мексики (координаты очага $16,8^\circ \text{ N}$, $98,6^\circ \text{ W}$) и имело магнитуду $M = 7,2$. Кроме аналоговой фильтрации при регистрации для всех компонент сейсмических колебаний (кривые 1–3) выполнена дополнительно полосовая фильтрация с полосой пропускания 1–4 ч. Характер колебательного процесса отвечает представлениям о биениях близких частотных составляющих, а также, вероятно, о модуляции сейсмогравитационных колебаний суточной приливной компонентой. Среди правильных колебаний наиболее повторяемым является колебание с периодом 2 ч. Отмечается резкое возрастание интенсивности колебаний на всех компонентах примерно в 8 ч 13 сентября, имеющее сейсмическую природу.

Динамика сейсмогравитационных колебаний Земли и сейсмичность

Динамика сейсмогравитационного процесса исследовалась после предварительной обработки аналоговых записей. Исходные ряды были отфильтрованы фильтром Баттерворда 6-го порядка с полосой пропускания 2–4 ч, после чего проведено суммирование квадратов амплитуд записей во временном окне длительностью 12 ч с последовательным сдвигом его на 6 ч. Характеристика процесса, получаемая таким методом, отвечает понятию “интенсивность”, причем в качестве единицы времени выступает длительность временного окна, т. е. 12 ч.

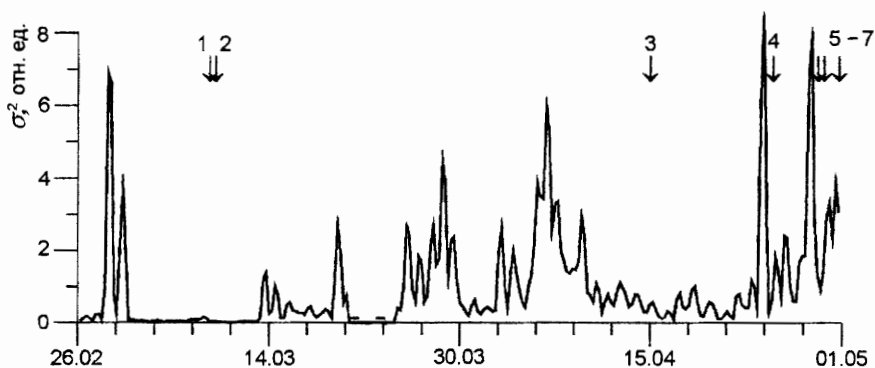


Рис. 2. Интенсивность сейсмогравитационных колебаний Земли в Санкт-Петербурге (Ленинграде) в 1989 г.

Анализ интенсивности сейсмогравитационных колебаний, проведенный по непрерывным данным наблюдений с октября 1988 по апрель 1991 г., позволил выделить только четыре периода, в течение которых динамическая активность Земли существенно возрастала. Даты и продолжительности этих периодов не позволяют связать их с сезоном года:

1-й период — октябрь 1988 г.

2-й период — примерно с 15 марта по 27 апреля 1989 г.;

3-й период — с 1 ноября по 15 января 1990 г.;

4-й период — с 3 июня по 30 июля 1990 г.

Характер сейсмического процесса при низкой и высокой интенсивности колебаний показан на рис. 2, 3. Высокая сейсмическая активность на Земле (землетрясения с $M > 6,5$, номера их из таблицы представлены у стрелок) проявляется, как правило, после возрастания интенсивности сейсмогравитационных колебаний. При низкой динамической активности Земли сильных землетрясений практически не наблюдается. Особенно отчетливо это видно на рис. 2, иллюстрирующем интенсивность сейсмогравитационного процесса в марте–апреле 1989 г. Низкий уровень интенсивности относительно среднего за этот промежуток времени наблюдался с 26.02 по 13.03 и с 11.04 по 22.04, высокий — с 13.03 по 11.04. Данные о землетрясениях, времена возникновения которых отмечены вертикальными стрелками, приведены в таблице. Следует заметить, что более слабые землетрясения мы не рассматриваем, так как в работе [9] было установлено, что они имеют равномерное распределение и, следовательно, случайный характер в статистическом смысле. Рис. 3 характеризует интенсивность сейсмического процесса в динамике с 27 апреля по 24 сентября 1993 г. Возрастание интенсивности относительно среднего уровня начинается за неделю до цикла сильной сейсмичности этого года. Особенно заметно это в максимуме, который приходится на период с 22 июня по 12 августа и предваряет сильное землетрясение на о. Хоккайдо ($M = 7,7$). На обоих рисунках резко выделяются различные по амплитуде кратковременные возмущения интенсивности длительностью 5–20 ч, впервые исследованные в [9]. Предполагается, что они перспективны в качестве краткосрочных предвестников землетрясения. Частота появления этих феноменов высока во время динамической активности Земли, и следует подчеркнуть, что их амплитуда чаще всего не возрастает после землетрясений.

Рис. 4, а представляет интенсивность сейсмогравитационных колебаний в конце 1994 — начале 1995 г., зарегистрированных в Санкт-Петербурге. Отличием от предыдущих временных рядов и главной особенностью этого является наличие очень длительных вариаций интенсивности с периодами 7–10 сут, продолжавшихся до конца февраля 1995 г. На рис. 4, б показано изменение интенсивности колебаний в узких полосах спектра с центральными периодами 1, 2, 3, 4 и 5 ч, рассчитанное после соответствующей фильтрации с применением фильтра Баттерворда. Как можно видеть из рисунка, динамика различных компонент не одинакова. При анализе кривых 1 и 2 наблюдается локализованное во времени возмущение интенсивности процесса. При этом было отмечено, что близкие к нему по времени возникновения землетрясения с номерами 17, 18 и 19 произошли после того, как началось возмущение сейсмогравитационных колебаний. К тому же эпицентры только этих землетрясений расположены на континенте Евразия или его границе. Например, перед землетрясениями в Тихом океане или Калифорнии никаких особенностей на трассах 1 и 2 не наблюдается. Указанный факт отражает, по-видимому, причинно-следственную связь между этими компонентами и процессами в очагах землетрясений вокруг Евразии. Если это верно, то зарегистрированные в Санкт-Петербурге сейсмогравитационные колебания дают информацию о внутриплитовой динамике.

Поведение компонент, представленных кривыми 3 и 4, заметно отличается от рассмотренных. Интенсивность пятичасовой компоненты (кривая 5), вначале невысокая, заметно возрастает с ростом сейсмической активности, причем независимо от местоположения очага землетрясения.

Резюмируя сказанное, можно сформулировать основной вывод. Существенное возрастание мощности длиннопериодных колебаний относительно фонового уровня,

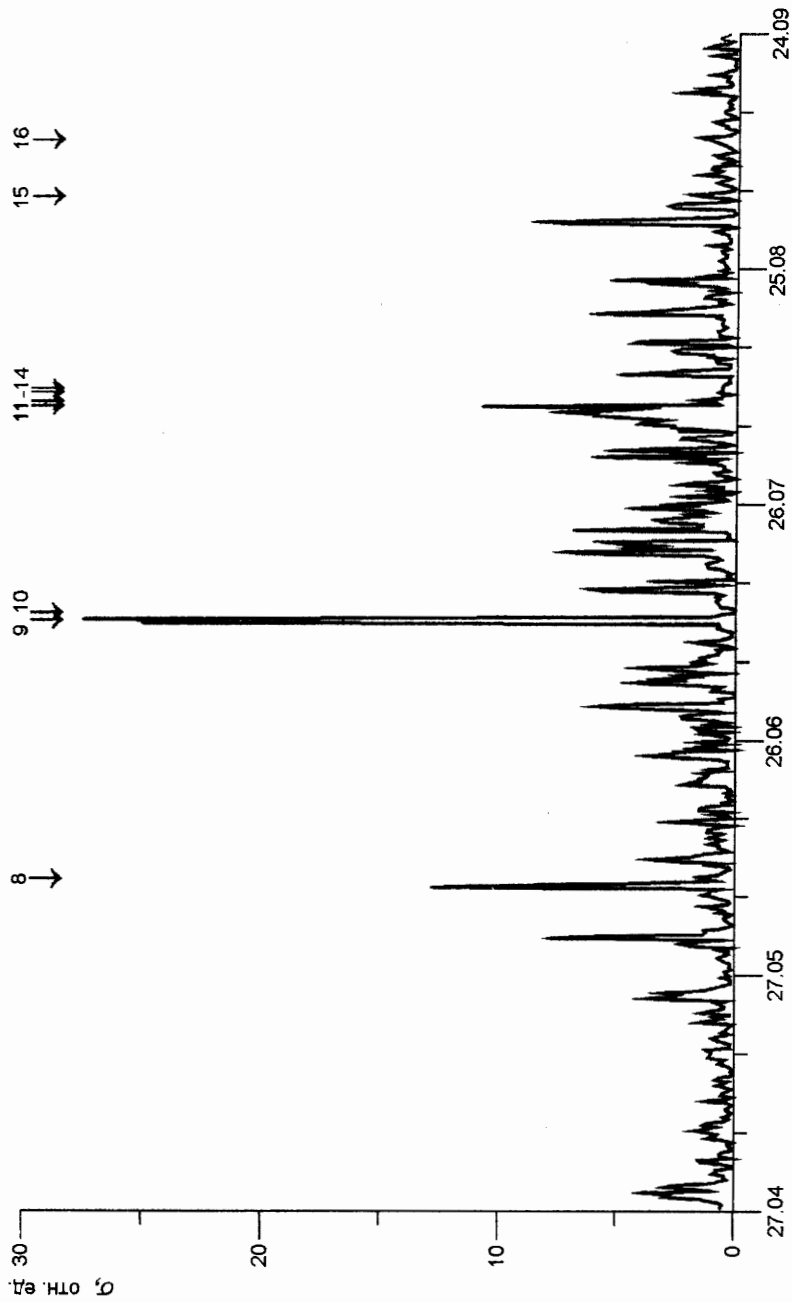


Рис. 3. Интенсивность сейсмогравитационных колебаний Земли в Санкт-Петербурге в 1993 г.

Номер события	Дата время	Магнитуда ML	Координаты очага, град	Местоположение очага
1	10.03.89 21:49	6,6	-13,70; 34,42	Юго-восточная Африка
2	11.03.89 05:05	6,7	-17,74; -174,76	о-ва Тонга
3	11.04.89 03:56	6,6	49,48; 159,18	Курильские о-ва
4	20.04.89 22:59	6,3	57,16; 121,97	Восточная Сибирь
5	25.04.89 02:13	6,7		Китай
6	25.04.89 14:29	7,1	16,70; -99,32	Мексика
7	27.04.89 02:20	6,6	30,60; 140,58	Япония
8	08.06.93 13:03	7,5	51,22; 157,83	п-в Камчатка
9	11.07.93 13:36	6,6	-25,30; -70,17	Чили
10	12.07.93 13:17	7,7	42,85; 139,20	о-в. Хоккайдо
11	07.08.93 17:53	6,7	-23,87; 179,85	м. Фиджи
12	08.08.93 08:34	8,0	12,98; 144,80	Марианские о-ва
13	09.08.93 12:42	7,0	36,38; 70,87	Гиндукуш
14	10.08.93 00:51	7,0	-45,28; 166,93	Н. Зеландия
15	03.09.93 12:35	6,8	14,50; -92,70	Мексика
16	10.09.93 19:12	7,2	14,72; -92,64	Мексика
17	28.12.94 12:19	7,2	40,30; 142,39	Япония
18	06.01.95 22:37	7,0	40,22; 142,24	Япония
19	16.01.95 20:46	6,9	34,54; 135,00	Япония
20	27.01.95 20:16	6,7	-4,45; 134,46	Индонезия
21	05.02.95 22:51	7,1	-37,71; 178,76	Н. Зеландия
22	13.02.95 15:04	6,7	-1,35; 127,52	Индонезия
23	19.02.95 04:03	6,6	40,56; -125,50	Калифорния

наблюдаемое раньше последовательностей землетрясений с магнитудами $M > 6,5$, позволяет предполагать наличие причинно-следственной связи между ними. Характер этой связи предстоит еще исследовать. Наиболее вероятны два варианта. Первый

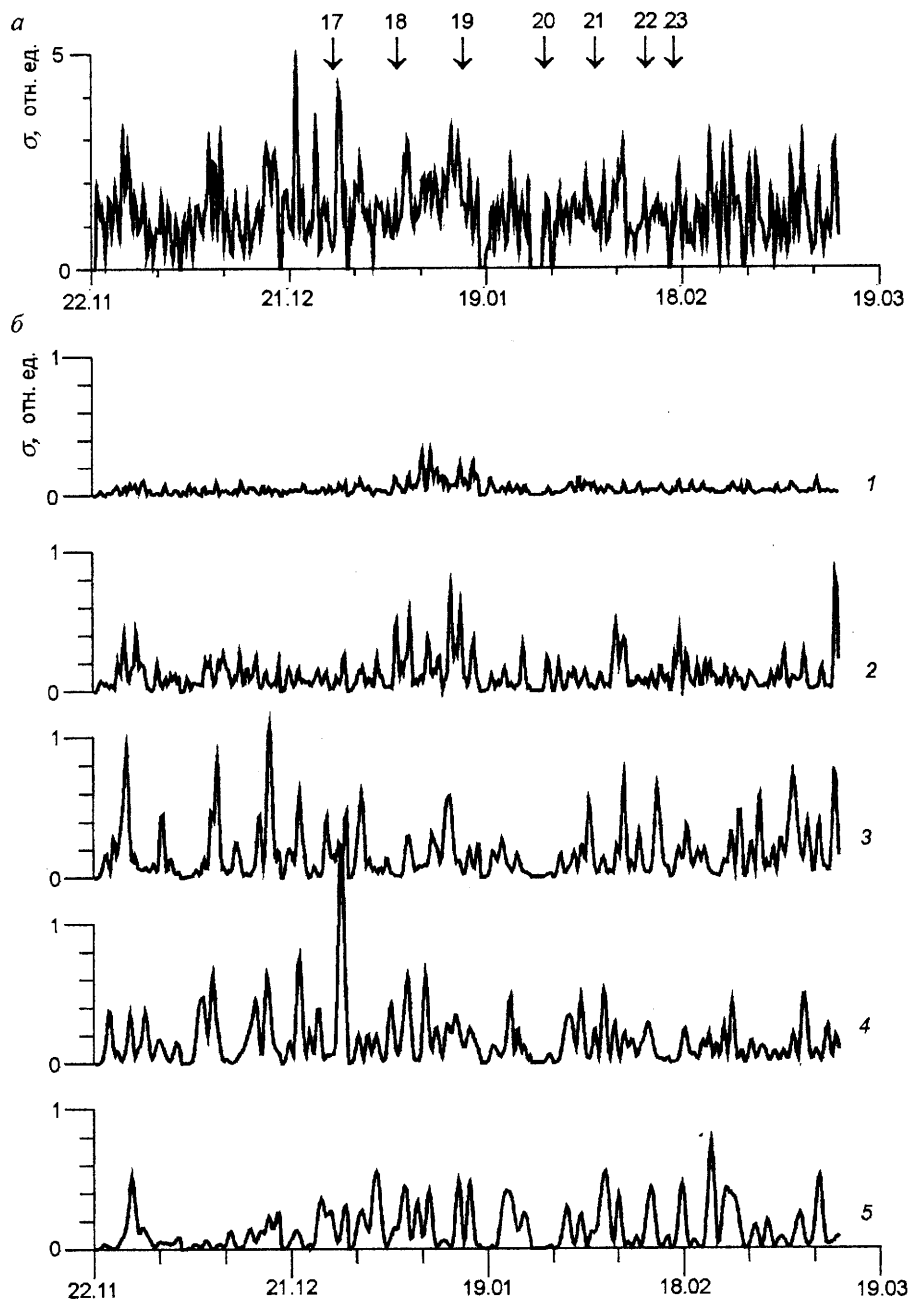


Рис. 4. Интенсивность сейсмогравитационных колебаний Земли в Санкт-Петербурге в 1994–1995 гг. с периодами 1 – 5 ч (а) и после узкополосной фильтрации (б) с центральными периодами 1, 2, 3, 4 и 5 ч (кривые 1 – 5 соответственно).

состоит в том, что динамические процессы в твердой Земле могут действовать как естественный вибрационный ускоритель разрушения горных пород, а кратковременные пульсации мощности — являться инициирующим фактором. Однако возможно и другое, — именно в низкочастотной области проявляются релаксационные процессы, протекающие в очагах землетрясений во время их длительной подготовки.

Указатель литературы

1. Линьков Е. М., Типисев С. Я., Буценко В. В. Помехоустойчивость длиннопериодного сейсмографа и анализ его записей // Геофизическая аппаратура. Вып. 75. Л., 1982. С. 78–87.
2. Линьков Е. М., Петрова Л. Н., Савина Н. Г., Яновская Т. Б. Сверхдлиннопериодные колебания Земли // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 321–324.
3. Петрова Л. Н., Савина Н. Г. Низкочастотный спектр Земли // Изучение строения Земли по сейсмологическим данным. Киев, 1986. С. 67–73.
4. Петрова Л. Н., Линьков Е. М., Зурошвили Д. Д. Планетарный характер сверхдлиннопериодных колебаний Земли // Вестн. Ленингр. ун-та, 1988. Сер. 4. Вып. 4(25). С. 21–26.
5. Линьков Е. М. Наблюдение длиннопериодных колебаний Земли в отсутствие сильных землетрясений // Проблемы современной сейсмологии. М., 1985. С. 95–98.
6. Петрова Л. Н. Возможная природа и механизм образования сейсмогравитационных колебаний Земли // Интерпретация геофизических наблюдений. Вопросы геофизики. Вып. 34. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1994. С. 14–33.
7. Петрова Л. Н. Статистический анализ спектров длиннопериодных колебаний Земли в диапазоне периодов 10–120 минут: Канд. дис. Л., 1983.
8. Alterman Z., Jarosch H., Pekeris C. L. Oscillations of the Earth // Proceedings of the Royal Society of London. 1959. Vol. A252. N 1268. P. 80–95.
9. Линьков Е. М., Петрова Л. Н., Осипов К. С. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 5. С. 1095–1098.
10. Osypov K. S., Petrova L. N. Seismic process in the period band 1–5 H: is it signal or noise? // XXIII General Assembly European Seismological Commission 7–12 September 1992. Prague: Programme and Abstracts. Abstract SC-B2/4.
11. Давыдов А. В., Долгих Г. И. Регистрация сверхнизкочастотных колебаний 52,5-м лазерным деформографом // Физика Земли. 1995. № 3. С. 64–67.
12. Долгих Г. И., Копвиллем У. Х., Павлов А. Н. Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформографом // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 2. С. 15–20.
13. Нестеров В. В., Головин С. Л., Насонкин В. А. Измерения длиннопериодных колебаний Земли лазерными интерферометрами-деформографами // Физика Земли. 1990. № 4. С. 72–78.
14. Florsch 'N., Legros H., Hinderer J. The search for harmonic signals in a spectrum with application to gravity data // Phys. Earth Planet. Inter. 1995. N 90. P. 197–210.
15. Линьков Е. М., Орлов Е. Г., Петрова Л. Н., Карпинский В. В. Сейсмогравиметрический комплекс // Развитие методов и средств экспериментальной геофизики. Вып. 2. М., 1996. С. 252–259.
16. Линьков Е. М. Супердлиннопериодный горизонтальный сейсмометрический канал // Разработка и методы исследований сейсмометрических преобразователей (Сейсм. приборы. Вып. 23). 1992.

Исследования, представленные в этой работе, выполняются при поддержке РФФИ, проект 97–05–64186.