

## ЭФФЕКТЫ ЛУННО-СОЛНЕЧНОГО ПРИЛИВА В ЗЕМНОЙ КОРЕ И АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2017 г. В. В. Адушкин, С. А. Рябова, А. А. Спивак\*

*Институт динамики геосфер РАН, г. Москва*

*\*E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 05.12.2016 г.

Рассматривается влияние гравитационного взаимодействия в системе Земля–Луна–Солнце на формирование временных вариаций геофизических полей и некоторых природных процессов. По результатам анализа результатов инструментальных наблюдений выделены основные периодичности и цикличности временных вариаций объемной активности подпочвенного радона, периоды которых совпадают с периодами изменений вертикальной компоненты приливной силы. Демонстрируется амплитудная модуляция сейсмического фона лунно-солнечным приливом. Показано, что интенсивность релаксационных процессов в земной коре характеризуется околосуточной периодичностью, а в спектре вариаций уровня подземных вод хорошо выделяются приливные волны. На основе данных, полученных при регистрации наклонов земной поверхности, анализируется роль приливной деформации в формировании блоковых движений в земной коре. Предложен новый подход к регистрации приливных волн в атмосфере на основе анализа микропульсаций атмосферного давления с помощью адаптивных режекторных фильтров.

*Ключевые слова:* гравитационное взаимодействие, лунно-солнечный прилив, приливные волны, деформация, геофизические поля, сейсмический фон, эманация радона, подземные воды, атмосферное давление

DOI: 10.7868/S0002333717040019

### ВВЕДЕНИЕ

Гравитационное взаимодействие в системе Земля–Луна–Солнце является одним из основных факторов, которые определяют режимы большинства геодинамических процессов. Если собственное гравитационное поле стремится придать Земле форму шара, то притяжение Луны и Солнца вызывает изменение формы Земли, придавая ей форму сплюснутого эллипсоида. Такая изменяющаяся во времени деформация Земли носит глобальный характер и затрагивает все ее оболочки (от внутреннего ядра до атмосферы). Вследствие изменения относительного положения Земли, Луны и Солнца деформация, вызванная притяжением Луны и Солнца, перемещается по поверхности Земли в виде приливных волн. Возникающие в твердых оболочках Земли крупномасштабные движения вещества и деформационные процессы сопровождаются изменением напряженного состояния среды. Изменение напряженно-деформированного состояния среды приводит к сдвиговым перемещениям вещества и, как результат, к диссипации энергии. Энергия лунно-солнечных приливов достигает  $\sim 10^{20}$  Дж/год и находится на уровне глобальных природных источников энергии, таких, напри-

мер, как тепловой поток из недр Земли ( $\sim 10^{21}$  Дж/год), радиоактивный распад глубинного вещества ( $\sim 10^{20}$ – $10^{21}$  Дж/год), энергия тектонических деформаций ( $\sim 10^{19}$ – $10^{20}$  Дж/год), энергия вулканических извержений ( $\sim 10^{15}$ – $10^{20}$  Дж/год). Это означает, что лунно-солнечный прилив представляет собой один из важнейших факторов, определяющих механику деформирования и существенные преобразования в земной коре, а также режимы геофизических полей и интенсивность межгеосферных взаимодействий [Адушкин и др., 2006; Адушкин, Спивак, 2012]. Разуплотнение и уплотнение земного вещества в результате действия прилива вызывает преобразование структуры земной коры, изменение режима подземных вод, физико-механических и электрофизических характеристик горных пород на приповерхностных участках Земли [Дьяконов, Улитин, 1982; 1988; Жамалетдинов и др., 2000; Адушкин, Родионов, 2005; Спивак, Хазинс, 2013; Беседина и др., 2015]. В большей степени это проявляется в зонах влияния тектонических разломов [Молоденский, 1983; Marechal et al., 2002; Moussa, El Arabi, 2003; Спивак, 2010].

Изменение механических и электродинамических характеристик вещества разломных зон и

земной коры в целом, вариации режима подземных вод в результате прилива определяют особенности геоэлектрических эффектов, которые проявляются в формировании устойчивых околосуточных вариаций поля земных токов, хорошо выраженных периодичностей электрического поля в грунте [Кролевец, Копылова, 2003; Кугаенко, 2005], а также в формировании периодичностей в дискретной составляющей электрического поля (события импульсного типа) на приповерхностных участках земной коры [Адушкин и др., 2006].

Велика роль приливных процессов в накоплении деформаций и напряжений, в первую очередь — в зонах нарушения сплошности среды [Спивак, Хазинс, 2013]. С этой точки зрения приливно-волновая деформация в среде блочно-иерархического строения оказывает существенное влияние на тектонические процессы в литосфере, связанные, в частности, с подготовкой землетрясений. Имеющиеся данные свидетельствуют не только о связи частоты землетрясений (в том числе слабых) с периодичностями приливной волны [Авсюк и др., 2002; Николаев, 1994; 1996; Гольдин и др., 2008; Beeler, Lockner, 2003; Nanaka et al., 2002], но также о влиянии приливных эффектов на пространственное распределение очагов землетрясений [Булатова, 2005]. О влиянии приливного воздействия на сейсмичность отдельных территорий, а также на вариации сейсмического фона свидетельствуют результаты и других исследований [Кнопф, 1964; Shlien, 1972; Спивак, Кишкина, 2004; Моргунов и др., 2005; Юрков, Гитис, 2005]. Известен также отклик сейсмического фона на лунно-солнечный прилив [Рыкунов и др., 1980; Гордеев и др., 1995; Салтыков, 1995; Спивак, Кишкина, 2004].

Значительна роль приливно-волнового фактора в эманации подземных газов. В частности, обнаружены характерные периодичности в вариациях объемной активности почвенного радона, вызванные изменением проницаемости каналов миграции газа в результате разуплотнения среды в приливной волне [Уткин и др., 2006; Спивак и др., 2008; 2010; Choubey et al., 2011].

Приливные эффекты отчетливо наблюдаются также в атмосферных процессах [Адушкин и др., 2016], влияют на некоторые физические эффекты, например, вариацию потока тепловых нейтронов из земной коры [Алексеенко и др., 2009], оказывают влияние на глобальные процессы: инерционные и резонансные явления в ядре Земли, процессы на границе ядро—мантия [Молоденский, 2006; Молоденский, Молоденская, 2009] и т.д.

Отдельно следует отметить влияние приливных деформаций на режимы электрического и магнитного поля Земли [Saraev et al., 2002; Гохберг и др., 2007; Шереметьева, Смиронов, 2007; Стар-

жинский, 2008; Шереметьева, 2011; Терещенко и др., 2014; Шпынев и др., 2014].

И наконец, длительное, постоянно повторяющееся приливное лунно-солнечное возмущение можно рассматривать в виде глобального фактора, который, вызывая значительные перемещения глубинных и близповерхностных масс земного вещества, с большой вероятностью определяет не только пространственные особенности крупных форм рельефа земной поверхности, горизонтальную расслоенность земной коры и регматическую сеть разломов и трещин, но также нестабильность вращения Земли, выраженную в неравномерности ее вращения, и даже наблюдаемые изменения погоды и климата [Сидоренков, 2002; 2015; Ревуженко, 2013; Тектоническая..., 1990; Хаин, 2009; Хлыстов, 2016].

Все перечисленное позволяет говорить о земном приливе как о важном факторе, который не только определяет ритмы и направленность, но в известном смысле является триггером геофизических процессов в окружающей среде [Адушкин, Спивак, 2012].

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных в настоящей работе использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в течение 2004–2015 гг. в нескольких регионах России: Восточно-Европейской платформе, Горном Алтае, Байкальской рифтовой зоне. Наряду с перечисленными объектами привлекались данные инструментальных наблюдений, выполненных в других районах России.

Выполнялись режимные инструментальные наблюдения и анализировались результаты регистрации электрического поля в приземном слое атмосферы и в грунте, поля микросейсмических колебаний, эманационное поле природного радона в виде объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  в почвенной атмосфере и вариации уровня подземных вод безнапорного горизонта [Адушкин и др., 2006; 2012; Адушкин, Спивак, 2006; Соловьев, Спивак, 2007; 2009; Спивак и др., 2008; 2009б; 2009в; Спивак, Кожухов, 2004; Спивак, Кишкина, 2004]. Также регистрировались наклоны земной поверхности. Измерения выполнялись в стационарных условиях (Центр геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН (ЦГМ), геофизические обсерватории “Михнево” Института динамики геосфер Российской академии наук (ГФОНВ), “Акташ” Геофизической службы Сибирского отделения Российской академии наук, “Торы” Института солнечно-земных связей Российской академии наук), а также в пунктах оперативной регистрации, расположенных как в зонах влияния тектонических разломов, так и на срединных участках структурных блоков земной ко-

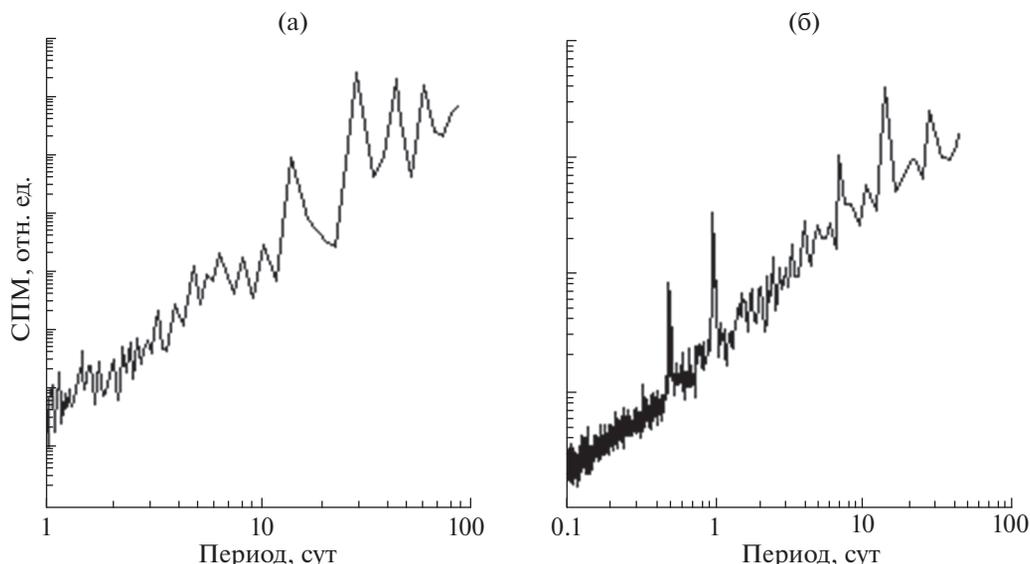


Рис. 1. Спектр мощности микросейсмического фона на сейсмической станции MNV (средний за период 2007–2008 гг.); диапазон частот, Гц: (а) – 0.1–0.5; (б) – 6–8.

ры. На обсерватории “Михнево”, расположенной в зоне влияния глубинной тектонической структуры (Нелидово-Рязанская шовная зона), регистрировались наклоны земной поверхности [Спивак и др., 2009а; Спивак, 2010б].

### ВЛИЯНИЕ ЛУННО-СОЛНЕЧНОГО ПРИЛИВА НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ ФОН

Фоновые сейсмические микроколебания и особенно их вариации, вызванные внешними воздействиями, являются важным индикатором геодинамического состояния и избирательности поглощающих свойств земной коры, а также добротность ее отдельных резонансных структур. Обработка данных сейсмической регистрации, выполненной в разных регионах, показывает высокую изменчивость амплитудных и спектральных характеристик микросейсмического фона. При этом в разных частотных диапазонах наблюдаются разные периодичности. Длиннопериодные колебания (диапазон 0.1–0.5 Гц) характеризуются периодичностями с периодами ~14, 28, 45, 60 и 365 сут (для примера на рис. 1 приведены данные ГФО “Михнево” ИДГ РАН). В высокочастотном микросейсмическом шуме можно выделить и другие, более короткие периоды. Например, в диапазоне частот 6–8 Гц наилучшим образом проявляются периодичности с периодами около 12 и 24 час и дополнительно с периодом 7 сут (рис. 16). Наличие двухнедельной (~14 сут) и околосесячной (~28 сут) периодичностей, которые проявляются как в длиннопериодной, так и короткопериодной частях спектра, связано с влиянием на сейсмический фон приливных волн  $M_f$

и  $M_m$ . При этом следует отметить, что отмеченные периодичности характерны также для отдельных составляющих сейсмического фона. В качестве примера на рис. 2 представлена периодограмма вариаций спектральной компоненты сейсмического шума с периодом 12 час.

Нелинейные процессы, протекающие в земной коре в процессе ее деформирования в результате прилива, вызывают характерную реакцию сейсмического фона. Как показывают результаты инструментальных наблюдений корреляции между амплитудой микросейсмического фона в широком диапазоне частот и величиной приливной силы напрямую не наблюдается [Гальперин и др., 1987]. Однако для отдельных частотных интервалов  $\Delta F$ , отличающихся для разных участков земной коры, такая корреляция существует [Рыкунов и др., 1979; Гордеев и др., 1995; Спивак, Кишкина, 2004]. Причем, для отдельных частотных диапазонов коэффициент корреляции может достигать значения 0.85 (см. примеры спектральных составляющих на рис. 3)<sup>1</sup>. Здесь важно отметить, что максимумы амплитуды возмущенного сейсмического фона и приливной силы смещены относительно друг друга примерно на 4 часа (максимум отклика среды достигается в момент максимальной скорости изменения силы).

Важно отметить, что отмеченная выше модуляция амплитуды микросейсмического фона наблюдается на большинстве участков земной коры,

<sup>1</sup> Здесь и далее величина приливной силы определялась, а основные приливные волны выделялись с помощью программы ETERNA [Wenzel, 1994].

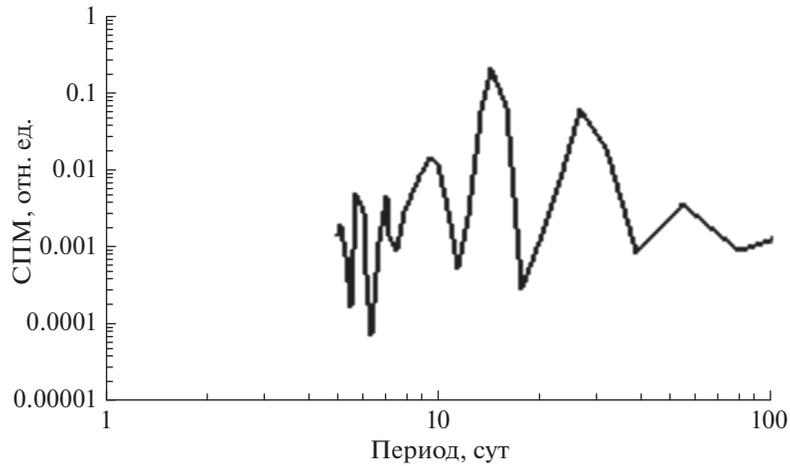


Рис. 2. Спектр смещений в спектральной компоненте микросейсмического фона с периодом  $\sim 12$  ч.

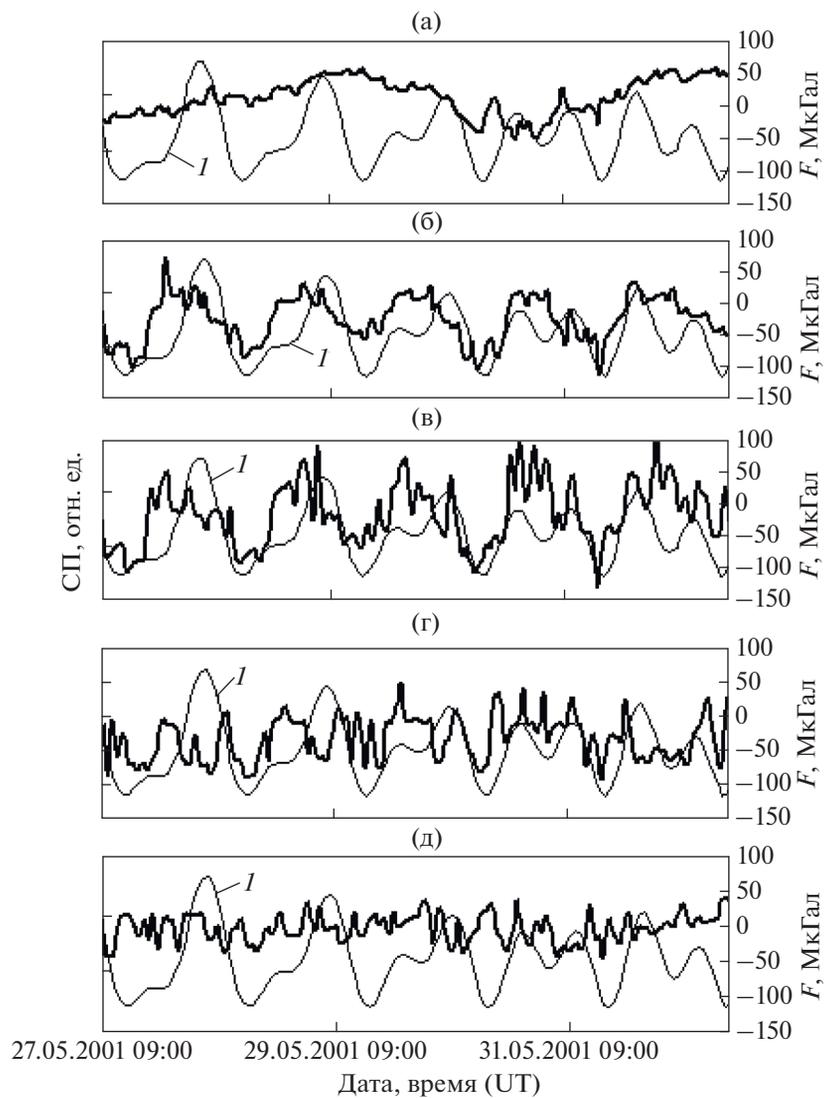
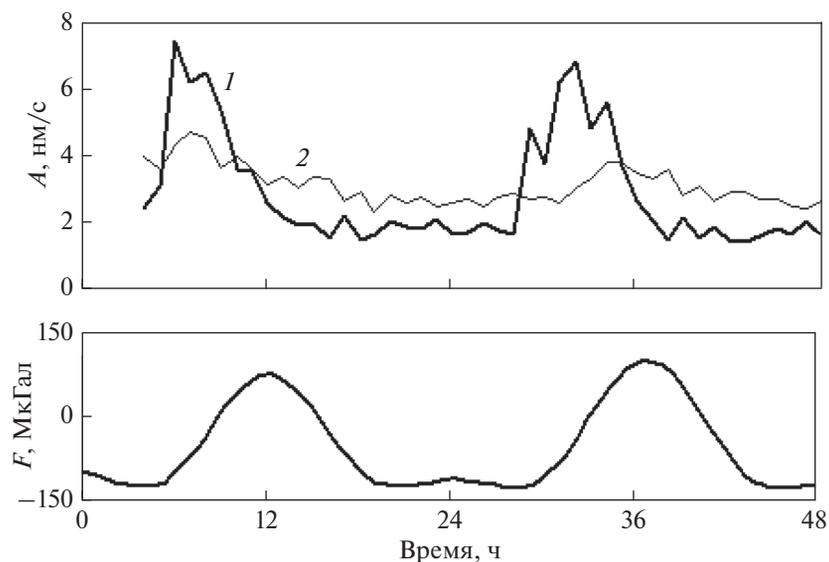


Рис. 3. Модуляция спектральных составляющих сейсмического фона приливной силой; спектральная составляющая, Гц: (а) – 1; (б) – 2; (в) – 3.8; (г) – 10; (д) – 15 (тонкая линия – изменение вертикальной компоненты приливной силы).



**Рис. 4.** Вариации амплитуды микросейсмического фона  $A$  в диапазоне частот 7–10 Гц в пунктах, расположенных на тектоническом разломе II порядка (1) и вне зоны его влияния (2); нижняя панель — вертикальная составляющая приливной силы  $F$ .

включая высокие широты, где приливной эффект существенно ниже [Спивак, Кишкина, 2004].

Пониженная жесткость тектонических нарушений [Спивак, 2006; 2011] и, как следствие, — повышенная подвижность дробленных горных пород, заполняющих разломную зону, определяет повышенную реакцию микросейсмического фона на приливную деформацию в виде более интенсивных вариаций амплитуды его отдельных, характерных для конкретного участка земной коры спектральных составляющих по сравнению с серединными участками структурных блоков. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты регистрации микросейсмического фона в пунктах, расположенных в разломной зоне II порядка относительно Нелидово-Рязанской шовной зоны [Спивак, 2010а] и на серединном участке примыкающего к ней блока. Для сравнения на рис. 4 приведены вариации приливной силы  $F$ . Видно, что временные вариации среднеквадратической амплитуды микросейсмического фона  $A$  (в нашем случае в диапазоне частот 7–10 Гц) существенно выше в зоне разлома. Одновременно следует отметить высокосignificant корреляцию между величинами  $A$  и  $F$  (коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $K = 0.71$  при коэффициенте значимости  $p \leq 0.05$  при учете некоторого опережения реакции микросейсмического фона на прилив (максимум амплитуды вариаций микросейсмического фона совпадает с максимумом производной  $F'$ )).

#### ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВА НА ЭМАНАЦИЮ РАДОНА

Роль приливной деформации в эманационных процессах удобнее всего рассмотреть на примере радона — хорошо регистрируемого на практике радиоактивного газа. Результаты регистрации объемной активности природного радона  $^{222}\text{Ra}$  в подпочвенной атмосфере [Спивак и др., 2009б] свидетельствуют о наличии значительных временных вариаций интенсивности эманаций. Данные инструментальных наблюдений демонстрируют наличие периодичностей во временных вариациях объемной активности подпочвенного радона  $R$  с периодами около 12 и 24 час, а также 14 сут (рис. 5 и рис. 6). Указанные периодичности в интенсивности радоновых эманаций, хотя и проявляются в разной степени, наблюдаются повсеместно. Более ярко они проявляются в зонах влияния крупных тектонических структур. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты регистрации объемной активности подпочвенного радона в зоне влияния Нелидово-Рязанской шовной зоны и на серединном участке примыкающего к ней структурного блока. Наличие на спектре пиков с периодами 0.5 и 1 сут, ярко представленных на фоне других спектральных компонент, вследствие инерционности эманационного процесса отражает объединяющие воздействия групп приливных волн:  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$  и  $K_2$  (периоды около 12 час) и  $P_1$ ,  $K_1$  и  $O_1$  (периоды около 24 час).

Совпадение характерных периодичностей во временных вариациях  $R$  и  $F$  позволяет рассматривать вопрос о наличии значимой корреляционной связи между вертикальной составляющей

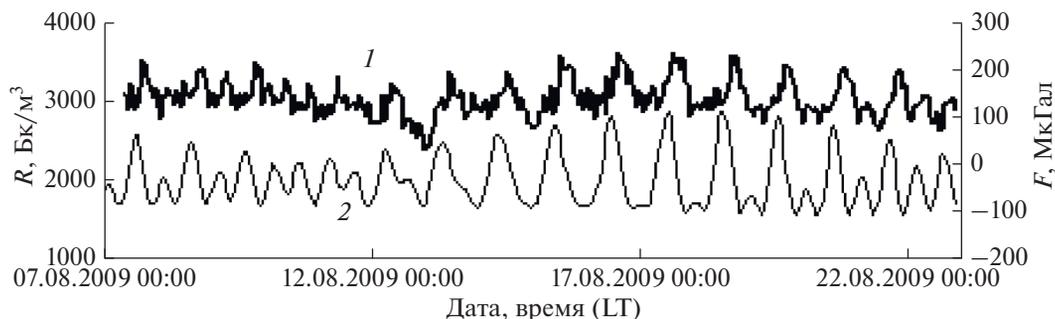


Рис. 5. Вариации объемной активности почвенного радона  $R$  в пункте, расположенном в зоне Тункинского рифта (1);  $F$  – вертикальная составляющая приливной силы (2).

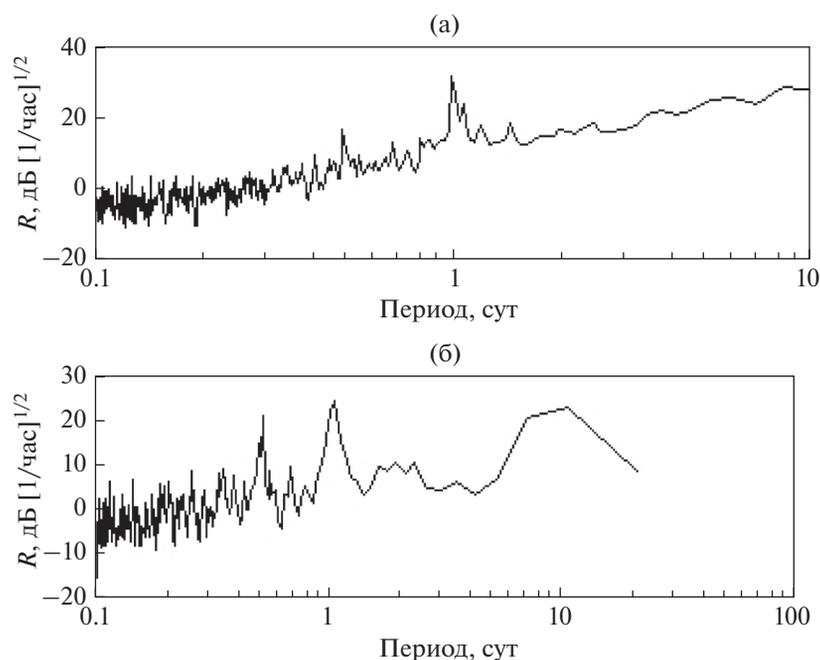


Рис. 6. Спектр мощности вариаций активности почвенного радона в зоне Нелидово-Рязанской шовной зоне (а) и в зоне Тункинского рифта (б).

приливной силы, определяющей степень разуплотнения среды в приливном горбе и объемной активностью почвенного радона. На графиках рис. 5. и рис. 7 визуально прослеживается корреляция вариаций  $R$  с величиной приливной силы  $F$ . Более детальный анализ показывает наличие в спектрах вариаций объемной активности почвенного радона ярко выраженных пиков, соответствующих приливным волнам  $S_2$  и  $M_2$ . В качестве иллюстрации на рис. 8а в качестве примера представлен взаимный спектры вариаций объемной активности почвенного радона и вертикальной составляющей приливной силы  $S_{RF}$  для одного из пунктов регистрации (Тункинская рифтовая зона).

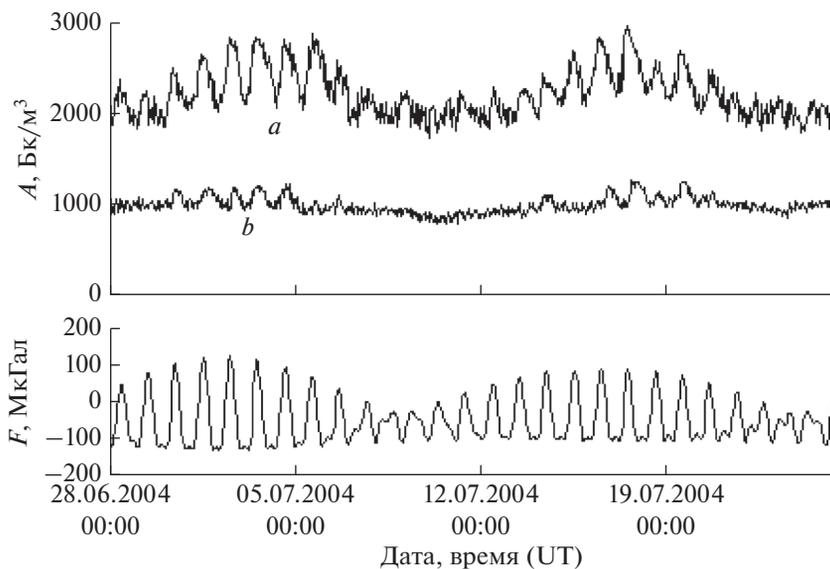
Вычисления корреляционных соотношений между вариациями  $R$  и  $F$  со сдвигом по времени

показывают, что максимальное значение коэффициента корреляции во многих случаях приближается к 0.7, причем максимум достигается при запаздывании реакции эманационного поля радона относительно приливной деформации примерно на 3–4 часа для разных участков земной коры (рис. 8б).

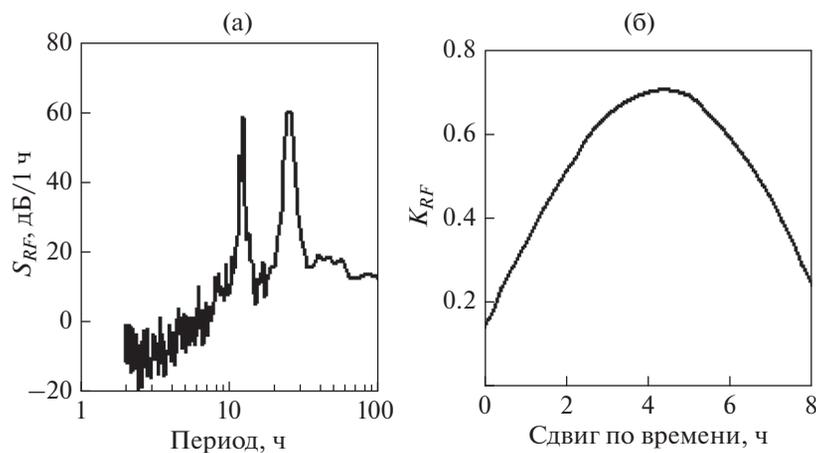
Таким образом, можно констатировать существенное влияние приливной деформации среды на интенсивность радоновых эманаций.

#### ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВА НА УРОВЕНЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Имеющиеся данные свидетельствуют о высокой чувствительности гидрогеологического режима к внешним возмущениям, в частности,



**Рис. 7.** Вариации объемной активности почвенного радона  $R$  в условиях длительной стабильности метеоусловий в пункте, расположенном в зоне влияния Нелидово-Рязанской шовной зоны  $a$  и в структурном блоке земной коры  $b$ ;  $F$  – вертикальная составляющая приливной силы.



**Рис. 8.** Взаимный спектр вариаций объемной активности почвенного радона и приливной силы (а) (Тункинская рифтовая зона) и коэффициент корреляции  $K_{RF}$  (б).

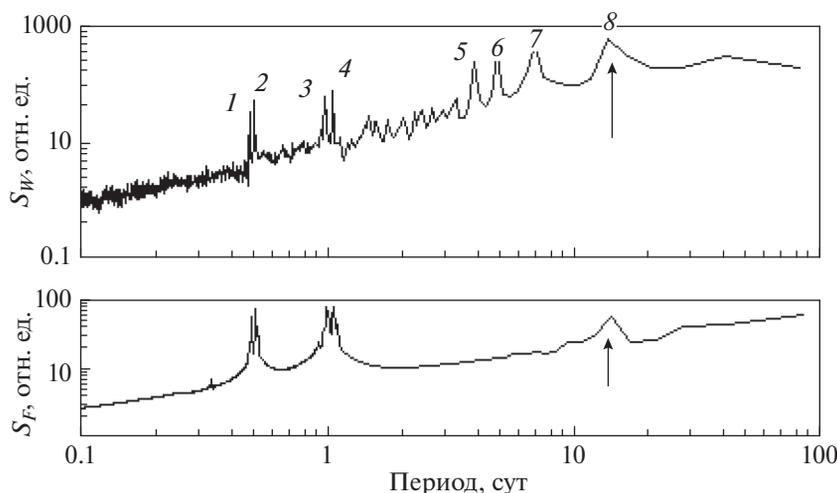
приливному воздействию [Marechal et al., 2002; Адушкин и др., 2012]. Это неудивительно, поскольку деформирование среды в приливной волне приводит к существенному изменению ее микро- и макроструктуры. Действительно, увеличение приливной силы вызывает деформации, связанные с увеличением объема среды и, следовательно, – увеличению ее пористости, а значит и проницаемости. Уменьшение приливной силы наоборот вызывает сжатие среды, т.е. – уменьшение ее проницаемости. Наиболее заметно эти эффекты проявляются в зонах ослабления прочности среды – разломах и крупных трещинах.

Сменяющийся попеременно характер деформирования среды естественным образом приво-

дит к периодическим вариациям режима подземных вод.

В качестве примера на рис. 9 представлены совместно периодограммы уровня подземных вод в открытой скважине  $S_W$  и вариаций приливной силы  $S_F$  за период длительностью 70 сут (с 19.07.2008 по 30.09.2008 (результаты инструментальных наблюдений на ГФО “Михнево” ИДГ РАН).

На приведенном спектре  $S_W$  хорошо выделяются ярко выраженные спектральные пики, свидетельствующие о наличии квазигармонических периодичностей в вариациях уровня подземных вод. Как это видно из рис. 9 полусуточные и околосуточные периодичности с периодами  $T$  около 12 и 24 час (группы спектральных пиков соответ-



**Рис. 9.** Периодограммы вариаций уровня подземных вод в открытой скважине ГФО МНУ ( $S_W$ ) и приливной силы ( $S_F$ ); 1–8 – спектральные пики; вертикальными стрелками обозначены спектральные пики, соответствующие двухнедельным периодичностям приливной силы.

ственно 1, 2 и 3, 4 на рис. 9) и периодичность с  $T \sim 12–14$  сут (пик 8) хорошо совпадают с периодами соответствующих приливных волн. Учитывая хорошее совпадение периодичностей и высокий коэффициент корреляции  $K \sim 0.73–0.82$  между вариациями  $S_W$  и  $S_F$ , следует отметить значительную роль приливных деформаций в вариациях местного гидрогеологического режима и, следовательно, в работе приливных сил в качестве “тектонического насоса” [Шило, Вашилов, 1989].

Также следует отметить, что на спектре вариаций уровня подземных вод (так же, как это наблюдалось в случае вариаций углов наклона блока) отчетливо видно разделение близких по периодам пиков в группах 1, 2 и 3, 4, которые соответствуют приливным волнам соответственно  $S_2$  и  $M_2$  и  $K_1$  и  $O_1$  (рис. 10). Это свидетельствует о высокой чувствительности режима подземных вод к вариациям приливной силы.

Другие периодичности с периодами  $T \sim 3; 4$  и 5 сут (спектральные пики 5–7 на рис. 9) обусловлены влиянием барических вариаций в атмосфере. Соответствие разных периодичностей в вариациях уровня подземных вод приливным деформациям демонстрирует рис. 11, на котором представлен взаимный спектр вариаций уровня воды и приливной силы  $K_{WF}$ .

#### ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВА НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИМПУЛЬСНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Вызываемая в результате гравитационного взаимодействия в системе Земля–Луна–Солнце деформация земного вещества в виде чередую-

щихся фаз растяжения и сжатия, оказывает существенное влияние на интенсивность релаксационных процессов – сброса накопленных в среде механических напряжений. Разуплотнение среды в приливном горбе облегчает подвижность находящихся в стесненных условиях блоков земной коры, в результате чего возникают дополнительные благоприятные условия для их релаксации. В простейшем случае интенсивность релаксационного процесса допустимо характеризовать количеством актов релаксации, каждый из которых сопровождается характерным микросейсмическим импульсом [Спивак, Кишкина, 2004]. В качестве примера на рис. 12 приведены совместно изменение количества микросейсмических импульсов релаксационного типа  $N_A$  и вариации вертикальной компоненты приливной силы  $F$ . Следует отметить значимую корреляцию между интенсивностью релаксационных процессов в среде и вариациями  $F$  (линейный коэффициент корреляции Пирсона  $K = 0.86$ ).

Поскольку значительная часть регистрируемых на приповерхностных участках земной коры электрических импульсов связана с механическими движениями в блочно-иерархической среде<sup>2</sup> [Соловьев, Спивак, 2009], представляет интерес рассмотрение дискретных характеристик электрического поля в грунте. Совместный анализ

<sup>2</sup> Это не противоречит представлениям, согласно которым электрические сигналы импульсного типа в грунте вызваны кратковременным нарушением либо изменением устоявшихся токовых систем, либо скачкообразным разделением электрических зарядов. И то и другое в твердой среде неоднородного строения можно объяснить механическими процессами, связанными с трещинообразованием и дифференциальными подвижками структурных блоков [Лосева и др., 2010; 2012].

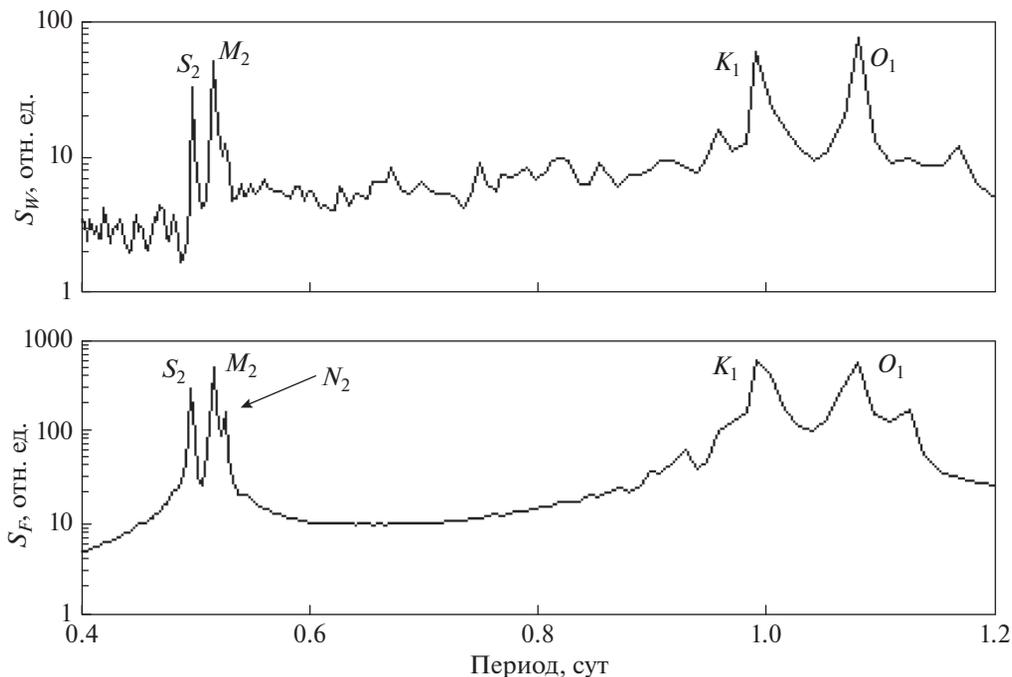


Рис. 10. Околосуточные периодичности вариаций уровня подземных вод  $S_W$  и приливной силы ( $S_F$ );  $S_2$ ,  $M_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$  и  $O_1$  – периоды соответствующих приливных волн.

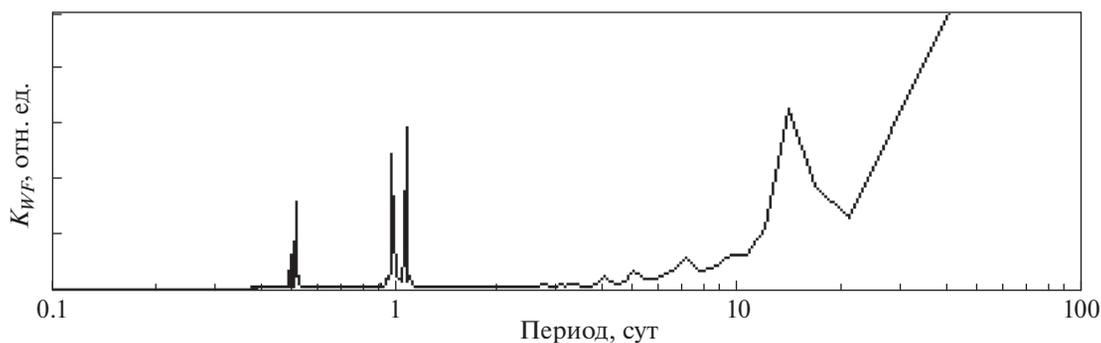


Рис. 11. Взаимный спектр вариаций уровня воды в открытой скважине и приливной силы ( $K_{WF}$ ).

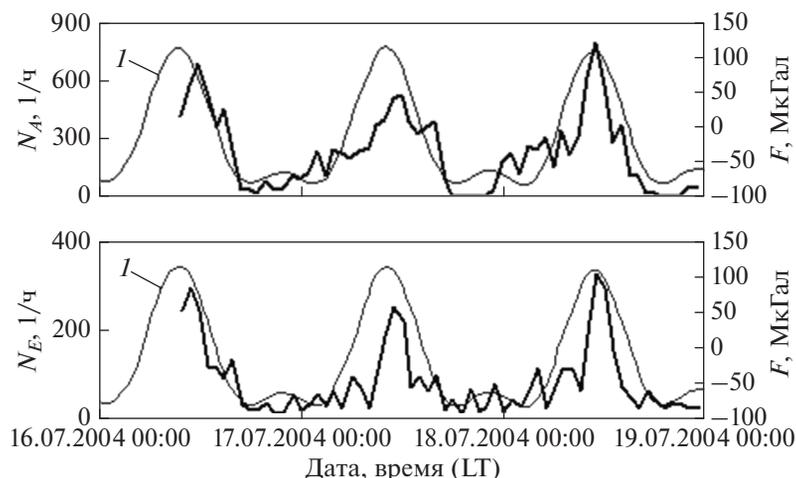
данных микросейсмических и электрических измерений, относящихся к случаю, когда электрический сигнал сопровождается сейсмическими импульсами, позволяет считать [Соловьев, Спивак, 2009], что генерация электрических и микросейсмических сигналов с большой вероятностью происходит в одном и том же источнике. При этом в качестве одного из наиболее вероятных механизмов генерации электрических импульсов в земной коре допустимо рассматривать дифференциальные подвижки блоков земной коры, когда источником электрических сигналов являются их активные грани. Как показывают расчеты, в этом случае параметры электрических импульсов хорошо согласуются с данными инструментальных наблюдений [Лосева и др., 2010; 2012].

Как показывает анализ синхронных наблюдений за электрическими импульсами в грунте и

сейсмическими импульсами релаксационного типа статистика дискретной составляющей электрического поля в грунте коррелирует с вариациями приливной силы. Это демонстрирует рис. 12, на котором представлена вариация количества электрических импульсов  $N_E$ , зарегистрированных на одном из участков земной коры. Значение линейного коэффициента корреляции Пирсона  $K = 0.78$  подтверждает значимую корреляцию между интенсивностью потока электрических импульсов в среде и вариациями  $F$ .

## ДВИЖЕНИЕ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ПРИЛИВНОЙ ВОЛНЕ

Изменение механических характеристик среды и, прежде всего, вещества разломных зон, учитывая их главенствующую роль в формировании



**Рис. 12.** Количество актов релаксации  $N_A$  и электрических импульсов в грунте  $N_E$  в зоне влияния Курайского разлома (Горный Алтай);  $F$  – вертикальная компонента приливной силы (тонкие линии  $I$ ).

режимов геофизических полей [Кузьмин, 2004; Спивак, 2010в], следует рассматривать в качестве одного из основных факторов, которые определяют изменения в режиме геодинамических процессов в земной коре. При этом необходимо учитывать, что преобразование вещества разломных зон определяется не только их размерами и веществом составом, но также интенсивностью их деформирования в результате дифференциальных движений примыкающих к разлому блоков земной коры. Здесь важно отметить, что наряду с трансляционными и ротационными движениями, которые наблюдаются в земной коре, существуют также и короткопериодные движения, близкие по характеру к прецессии. В частности, такие движения регистрировались при выполнении прецизионных наклономерных измерений на земной поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях (определялись наклоны структурного блока земной коры с линейным размером  $\sim 20$  км<sup>3</sup>) [Спивак и др., 2009а].

В качестве примера на рис. 13 приведены вариации наклонов земной поверхности относительно трендовой составляющей, характер которых близок к вариациям приливной силы  $F$ . При этом наряду с указанными периодичностями наблюдается хорошо выраженная двухнедельная периодичность, совпадающая по характеру с двухнедельной циклическостью вариаций приливной силы. Особо следует отметить, что на спектре вариаций наклонов (рис. 14) хорошо проявляются пики, которые обусловлены откликом блокового движения на наиболее значимые по величине смещения среды полусуточные и суточные приливные волны  $S_2$  (период 12 час),  $M_2$  (период

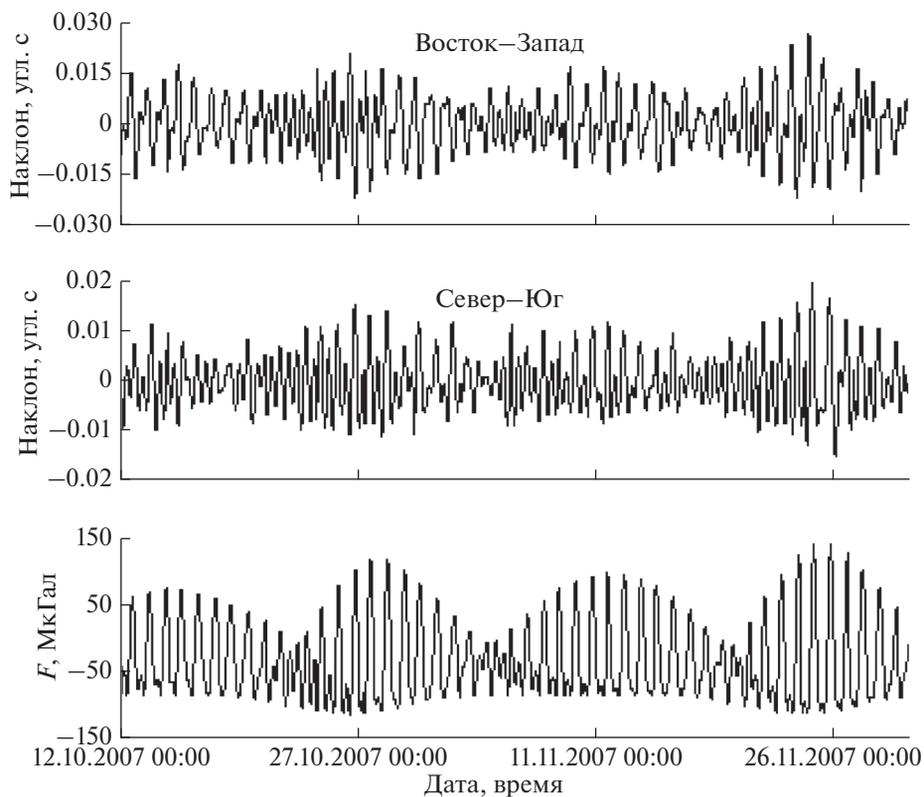
12.42 час),  $K_1$  (период 23.93 час) и  $O_1$  (период 25.81 час). Анализ данных демонстрирует значимую корреляцию между вариациями углов наклонов блока и изменениями приливной силы  $F$  (коэффициент ранговой корреляции Спирмена за период наблюдений составляет 0.7–0.8 при уровне значимости не хуже 0.995) [Адушкин и др., 2012].

### ПРИЛИВНЫЕ ВОЛНЫ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

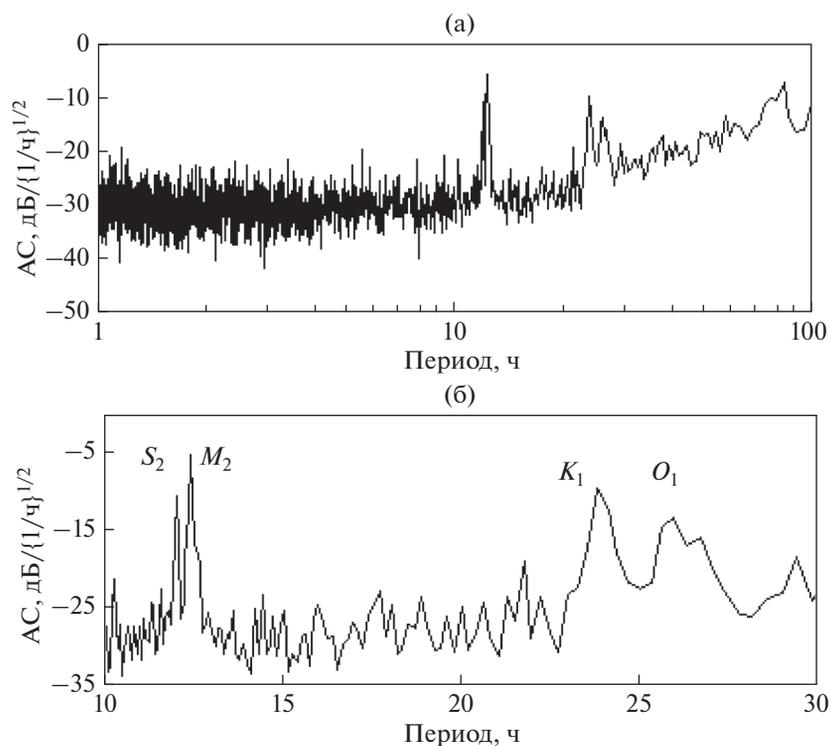
Атмосферный прилив, играет весьма значительную роль в формировании средних характеристик движения воздушных масс, как в глобальном, так и локальном масштабе [Адушкин и др., 2016б; Голицын, 2004; Сидоренков, 2002; 2015; Чепмен, Линдзен, 1972; Zurbenko, Portzeva, 2009]. В отличие от приливного эффекта в земной коре и литосфере атмосферный прилив является результатом действия трех факторов: гравитационного взаимодействия со стороны Луны и Солнца (гравитационная составляющая атмосферного прилива), вращения Земли и прогревом атмосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли, интенсивность которого определяется поглощением солнечной энергии, а периодичность характеризуется периодом 1 сут, который совпадает с периодом гравитационной приливной волны  $S_1$  (термическая составляющая атмосферного прилива).

Важность исследования атмосферного прилива связана в основном с необходимостью уточнения и установления новых морфологических особенностей глобальных и локальных распределений приливных вариаций атмосферного давления, а также векторных характеристик атмосферы (ветровые движение воздушных масс). Это представляет значительный интерес, в частности, при эксплуатации летательных аппаратов. Данные о при-

<sup>3</sup> Целостность и однородность блока обосновывалась результатами геологических исследований.



**Рис. 13.** Пример околосуточных вариаций наклонов блока земной коры за вычетом тренда;  $F$  – вертикальная компонента приливной силы.



**Рис. 14.** Амплитудный спектр (АС) вариаций угла наклона блока в направлении Восток–Запад (усреднение за период 07.09.2007–20.01.2008).

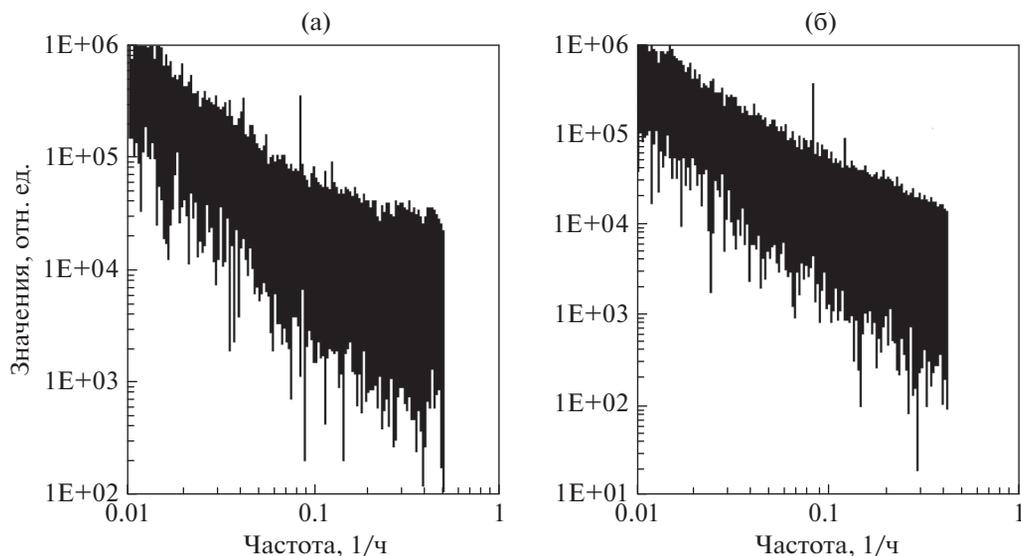


Рис. 15. Спектр колебаний атмосферного давления на ГФО МНВ (а) и в г. Москве (б).

ливных возмущениях атмосферы необходимы для уточнения модели внутреннего строения Земли и, в частности, процессов взаимодействия на границе ядро—мантия. Последнее связано с тем, что частота и амплитуда околосуточной нутации нашей планеты в значительной мере определяется ее внутренним строением. По этой причине анализ отклонения наблюдаемых и теоретически предсказанных амплитуд нутационных гармоник, что выполняется на основе данных о приливных эффектах в атмосфере [Сидоренков, 2002], предоставляет хорошие возможности для уточнения модели Земли.

Значительный интерес представляет изучение роли атмосферного прилива в формировании температурных аномалий на Земле. Наличие в спектрах температуры воздуха лунных циклов с периодами 355 сут (приливной год), 206 сут (полупериод эвекции) и 27 сут (сидерический месяц) позволяют рассматривать приливный фактор в качестве одной из основных причин циклических температурных аномалий на Земле [Сидоренков, 2015]. Информация о приливных вариациях характеристик атмосферы и суперпозиции приливных волн позволяет не только прогнозировать температурные аномалии типа аномалий 1972 и 2002 гг., но также оценивать климатические изменения на Земле [Сидоренков, 2015].

Хорошо известны сложности, связанные с изучением атмосферного прилива на основе анализа временных вариаций атмосферного давления. На фоне сильных вариаций атмосферного давления, связанных с барическими возмущениями атмосферы циклонами и антициклонами, трудно выделяются достаточно слабые приливные эффекты. Даже при использовании длинных

рядов записей атмосферного давления удастся выделить лишь некоторую часть приливных волн [Zurbenko, Potrzeva, 2009]. В качестве примера на рис. 15 приведены амплитудные спектры вариаций атмосферного давления для ГФО МНВ и ЦГМ, вычисленные за период регистрации 2008–2015 гг. Данные рис. 15 хорошо демонстрирует диапазоны периодов, характеризующиеся разномасштабной турбулентностью. Отчетливо выделяется один максимум на частоте  $\sim 0.0835$  1/час, который можно идентифицировать как приливную волну  $K_2$  (период 0.499 сут).

В окрестности периода 1 сут проявляются (хотя и не в полной мере отчетливо) спектральные составляющие приливных волн  $K_1$  и  $P_1$  с периодами соответственно 1.0027 и 0.9973 сут (участок спектра в окрестности периодов 0.5 и 1 сут в виде соответствующих периодограмм представлен на рис. 16). Представленные на рис. 15 и 16 данные свидетельствуют о том, что использование даже достаточно длинных рядов данных, полученных при измерении атмосферного давления, не позволяет регистрировать и соответственно выделять весь спектр приливных волн, что, по всей видимости, связано с сильным влиянием циклонических процессов, протекающих на средних широтах. С целью выделения приливных волн в атмосфере в работе [Адушкин и др., 2016] предложен подход, основанный на анализе не абсолютной величины атмосферного давления, а его микропульсаций. Действительно, использование указанного подхода с применением адаптивных режекторных фильтров [Уидроу и др., 1975; Уидроу, Стирнз, 1989] позволяет выделять практически все известные приливные волны. В качестве примера на рис. 17 приведены спектры микро-

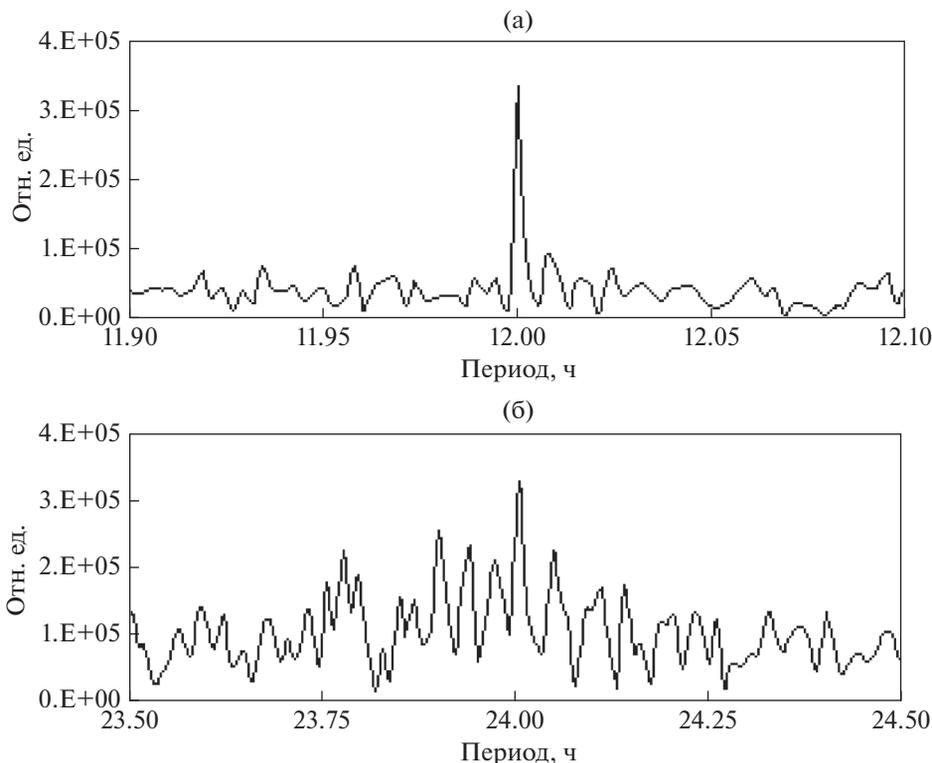


Рис. 16. Полусуточная (а) и околосуточная (б) области спектра колебаний атмосферного давления на ГФО МНУ.

пульсаций атмосферного давления в окрестности полусуточных и околосуточных периодов для условий г. Москвы.

Результаты обработки и анализа данных инструментальных наблюдений за микропульсациями атмосферного давления свидетельствуют о том, что с учетом неопределенности спектральных оценок периоды выделенных квазигармонических составляющих соответствуют периодам основных приливных волн. При этом следует отметить, что в отличие от земных приливов спектральные амплитуды солнечных приливов превышают амплитуду лунных. Это — известный факт, связанный с дополнительным влиянием терминатора — термического солнечного прилива [Чепмен, Линдзен, 1972].

Вследствие изменения взаимного расположения Земли, Луны и Солнца амплитуды приливных волн значительно варьируют со временем (в качестве примера на рис. 18 приведены вариации относительных спектральных амплитуд некоторых приливных волн, рассчитанные по данным настоящей работы). На графиках рис. 18 хорошо проявляются периодичности в вариациях рассматриваемых величин (например, амплитуда приливной волны  $K_2$  изменяется со временем с периодом  $\sim 4.8$  мес.). Особый интерес вызывает изменение во времени амплитуды солнечной эллиптической волны  $S_1$ , которая то достигает мак-

симальных значений, сравнимых, а временами даже превышающих амплитуду таких стабильно регистрируемые волн как  $K_2$ ,  $L_2$ ,  $M_2$  и других, то пренебрежимо мала. В связи с тем, что приливная волна  $S_1$  отражает термическую составляющую атмосферного прилива, рост и падение ее амплитуды должен определяться степенью нагрева атмосферы, т.е. величиной температурных вариаций. Как показывает анализ результатов наблюдений максимальные значения амплитуды солнечной приливной волны  $S_1$  наблюдаются в периоды повышенных относительных значений температуры воздуха  $T$ . Это хорошо видно из данных рис. 19, на котором приведен фрагмент температурных вариаций для одного из периодов времени, в котором, во-первых, хорошо выделяется приливная волна  $S_1$ , а, во-вторых, ее амплитуда принимает повышенное значение (рис. 18).

Поскольку температура воздуха определяется величиной солнечного прогрева представляет определенный интерес сравнить вариации амплитуды приливной волны  $S_1$  с интенсивностью солнечного излучения. Будем характеризовать уровень солнечного излучения индексом солнечной активности  $F10.7$  — параметром, который определяет интенсивность (плотность потока) радиоизлучения Солнца на частоте 10.7 см (2800 МГц). Анализ данных свидетельствует о совпадении периодов роста солнечной активности по

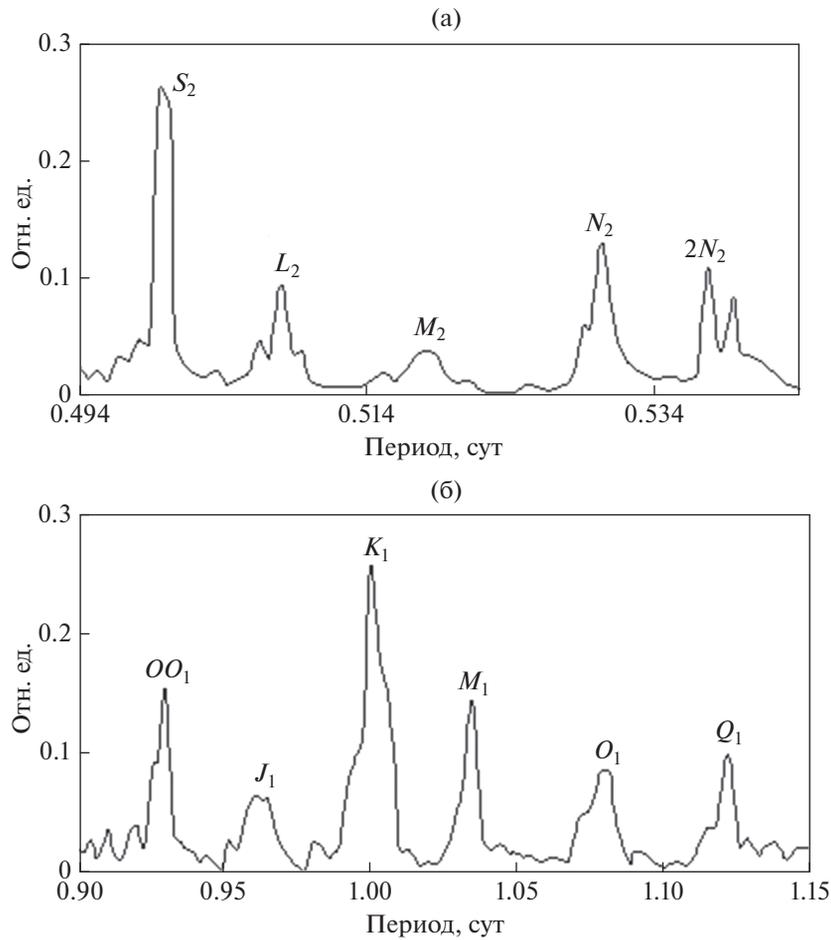


Рис. 17. Полусуточная (а) и околосуточная (б) области спектра колебаний атмосферного давления в г. Москве.

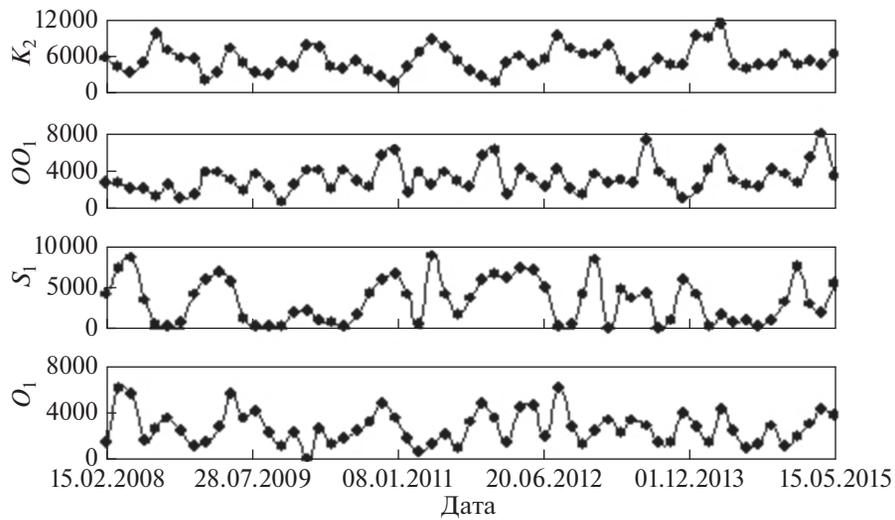
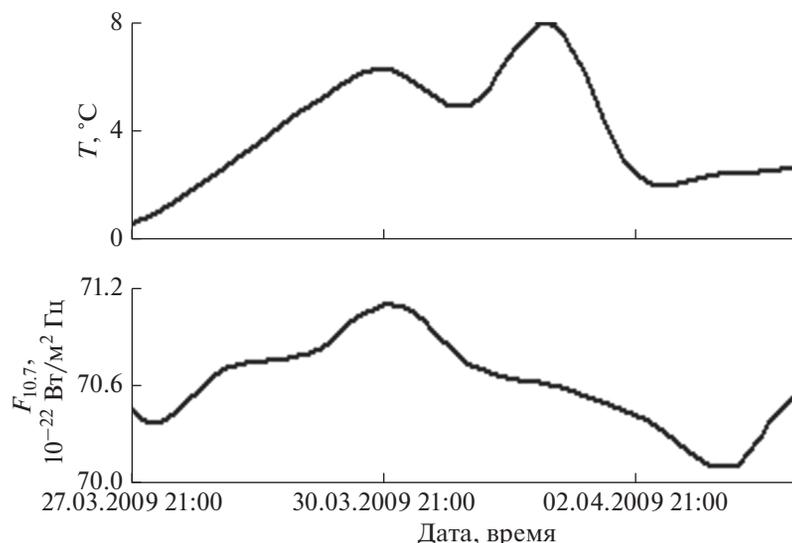


Рис. 18. Вариация амплитуд основных приливных волн за анализируемый период (ГФО МНУ).



**Рис. 19.** Вариация температуры воздуха и индекса солнечной активности в период повышенных амплитуд приливной волны  $S_1$ .

параметру  $F_{10.7}$  с периодами повышения температуры воздуха (рис. 19) и соответственно периодами роста амплитуды приливной волны  $S_1$ . Это происходит несмотря на то, что наблюдаемые за анализируемый период времени вариации  $F_{10.7}$ , как показывают оценки [Атмосфера..., 1991], вызывают изменение экзосолнечного потока солнечного излучения не более, чем на 0.3%. Последнее требует проведения дополнительных исследований с установлением возможных физических механизмов влияния космических факторов на приземную атмосферу.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о синхронности и значимой корреляции между временными вариациями рассмотренных геофизических полей и изменениями вертикальной компоненты приливной силы. Это позволяет рассматривать лунно-солнечный прилив в качестве одного из наиболее важных факторов, определяющих не только ход и ритмы механических и физических процессов, сопровождающих деформирование вещества Земли и его преобразование в результате периодического разуплотнения, но также важную роль в формировании режимов геофизических полей. В этом смысле земной прилив представляет собой фундаментальный механизм, заложенный самой природой, который в значительной мере определяет эволюционное развитие планеты Земля.

Приведенные данные свидетельствуют о сложности выделения околосуточных и полусуточных групп приливных волн в атмосфере на основе анализа вариаций атмосферного давления.

Предложенный подход, основанный на анализе микропульсаций атмосферного давления с помощью адаптивных режекторных фильтров, позволяет выделять практически все известные приливные волны (в этом случае необходимо привлекать данные о частотных характеристиках приливных волн, регистрируемых в земной коре, с целью формирования набора анализируемых частот и оценки синтезированного спектра).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авсюк Ю.Н., Худзинский Л.Л., Суворова И.И. Связь сейсмичности Земли с приливным воздействием Луны и Солнца // Вычислительная сейсмология. Вып. 33. 2002. С. 311–336.
- Адушкин В.В., Родионов В.Н. О природе механического движения в недрах Земли // Физика земли. 2005. № 2. С. 88–91.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора–атмосфера // Физика Земли. 2006. № 7. С. 34–51.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора–атмосфера // Физика Земли. 2012а. № 2. С. 14–26.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // Физика Земли. 2012б. № 3. С. 3–21.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Инструментальные наблюдения приливных волн в атмосфере // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 3. С. 343–346.
- Алексеев В.В., Гаврилюк Ю.М., Громушкин Д.М. и др. Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной

- коры с лунными периодами и сейсмической активностью // *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 91–100.
- Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеоздат. 1991. 509 с.
- Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М. и др.* Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Часть 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод // *Физика Земли*. 2015. № 1. С. 73–82.
- Булатова Н.П.* Широконое распределение сейсмичности Земли в зависимости от положения Солнца и Луны // *Вулканология и сейсмология*. 2005. № 2. С. 57–78.
- Гальперин Е.И., Винник Л.П., Петерсен Н.В.* О модуляции высокочастотного сейсмического шума приливными деформациями литосферы // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1987. № 12. С. 102–109.
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ван Раумбек М. и др.* Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири // *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11. № 4. С. 81–93.
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н.* К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами // *Докл. РАН*. 1995. Т. 340. № 3. С. 386–388.
- Гохберг М.Б., Колосницын Н.И., Николаев А.И.* Приливные деформации и электрокинетический эффект в двухслойной поронасыщенной среде // *Физика Земли*. 2007. № 8. С. 85–89.
- Дьяконов Б.П., Улитин Р.В.* Земные приливы и вариации физических характеристик горных пород // *Докл. АН СССР*. 1982. Т. 264. № 2. С. 322–325.
- Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевицов А.Н.* Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // *Докл. РАН*. 2000. Т. 371. № 2. С. 235–239.
- Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свищев И.С.* Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории ГФО “Михнево”. Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. М.: ГЕОС. 2008. С. 52–62.
- Кролевец А.Н., Копылова Г.Н.* Приливные составляющие в электротеллурическом поле // *Физика Земли*. 2003. № 5. С. 75–84.
- Кугаенко Ю.А.* Особенности геоэлектрического отклика среды на приливное воздействие // *Физика Земли*. 2005. № 7. С. 65–74.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 95–111.
- Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А.* Электрические и магнитные сигналы при стесненных движениях блоков земной коры // *Докл. РАН*. 2010. Т. 432. № 5. С. 685–688.
- Лосева Т.В., Спивак А.А., Кузьмичева М.Ю.* Дипольная модель генерации электрических импульсов при релаксационных процессах в земной коре // *Докл. РАН*. 2012. Т. 442. № 3. С. 401–404.
- Молоденский С.М.* О локальных аномалиях амплитуд и фаз приливных наклонов и деформаций // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1983. № 1. С. 3–19.
- Молоденский С.М.* О локальных аномалиях амплитуд и фаз приливных наклонов и деформаций // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1987. № 7. С. 3–9.
- Молоденский С.М.* О влиянии океанических приливов на величину инерциальной связи жидкого ядра с мантией // *Физика Земли*. 2006. № 5. С. 3–8.
- Молоденский С.М., Молоденская М.С.* Резонанс жидкого ядра по данным приливных гравиметрических наблюдений в Талгаре // *Физика Земли*. 2009. № 10. С. 3–8.
- Моргунов В.А., Боярский Э.А., Степанов М.В.* Землетрясения и фазы прилива // *Физика Земли*. 2005. № 1. С. 74–88.
- Николаев В.А.* Связь сейсмичности с фазами кратных и разностных приливных волн // *Докл. РАН*. 1996. Т. 349. № 3. С. 389–394.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.* Модуляция высокочастотных сейсмических шумов // *Докл. АН СССР*. 1978. Т. 238. № 2. С. 303–306.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.* Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1979. № 11. С. 72–77.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.В., Цыплаков В.В.* Лунно-солнечные приливные периодичности в линиях спектров временных вариаций высокочастотных микросейсм // *Докл. АН СССР*. 1980. Т. 252. № 2. С. 577–579.
- Салтыков В.А.* Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // *Докл. РАН*. 1995. Т. 341. № 3. С. 406–407.
- Салтыков В.А.* Возможные механизмы воздействия земных приливов на высокочастотный сейсмический шум // *Вулканология и сейсмология*. 1995. № 3. С. 81–90.
- Сидоренков Н.С.* Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука. 2002. 384 с.
- Сидоренков Н.С.* Небесно-механические причины изменения погоды и климата // *Геофизические процессы и биосфера*. 2015. Т. 14. № 3. С. 5–26.
- Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные эффекты при релаксационных процессах в земной коре неоднородного строения // *Докл. РАН*. 2007. Т. 417. № 6. С. 823–827.
- Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // *Физика Земли*. 2009. № 4. С. 76–84.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б.* Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // *Физика Земли*. 2004. № 7. С. 35–49.
- Спивак А.А., Кожухов С.А.* Пространственно-временные вариации природного радона в подпочвенной атмосфере // *Докл. РАН*. 2004. Т. 394. № 5. С. 686–688.
- Спивак А.А.* Жесткость тектонических структур центральной части Восточно-Европейской платформы // *Докл. РАН*. 2006. Т. 410. № 4. С. 109–112.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Харламов В.А.* Прецессионные движения структурных блоков земной коры // *Докл. РАН*. 2009а. Т. 426. № 5. С. 813–815.
- Спивак А.А., Кожухов С.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Эманация радона как индикатор интенсивности меж-

- геосферных взаимодействий на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. 2009б. № 2. С. 34–48.
- Спивак А.А.* Особенности геофизических полей в разломных зонах // *Физика Земли*. 2010. № 4. С. 55–66.
- Спивак А.А.* Оценка жесткости разломных зон земной коры на основе сейсмических данных // *Физика Земли*. 2011. № 7. С. 44–53.
- Спивак А.А., Хазинс В.В.* Изменение жесткости разломных зон в результате динамических воздействий // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 1. С. 97–100.
- Старжинский С.С.* Исследование динамики лунно-солнечных вариаций в геомагнитном поле // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 48. № 2. С. 275–286.
- Ревуженко А.Ф.* Приливные волны и направленный перенос масс Земли. Новосибирск: Наука. 2013. 204 с.
- Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / Белов А.А., Буртман В.С., Зинкевич В.П. и др. М.: Наука. 1990. 293 с.
- Терещенко Е.Д., Сидоренков А.Е., Григорьев В.Ф.* Влияние приливных эффектов на электромагнитное поле искусственного источника СНЧ-диапазона на Балтийском кристаллическом щите // *Физика Земли*. 2014. № 1. С. 114–119.
- Удроиу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь. 1989. 440 с.
- Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В., Кривашев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н.* Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на северном Тянь-Шане // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 61–70.
- Хаин В.Е.* О главных направлениях в современных науках о Земле // *Вестн. РАН*. 2009. Т. 79. № 1. С. 50–56.
- Хлыстов А.И.* Зональный прилив как возможная причина возникновения “критических широт” на Земле. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Т. 2. М.: ИФЗ. 2016. С. 623–629.
- Чепмен С., Линдзен Р.* Атмосферные приливы. М.: Мир. 1972. 295 с.
- Шереметьева О.В., Смирнов С.Э.* Приливные компоненты геомагнитных вариаций // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47. № 5. С. 624–633.
- Шереметьева О.В.* Составляющие геомагнитных вариаций с частотами приливных волн // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. Т. 51. № 2. С. 224–228.
- Шило Н.А., Вашилов Ю.А.* Земные приливы как тектонический насос и вибратор // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307. № 4. С. 833–836.
- Шпынев Б.Г., Ойнац А.В., Лебедев В.П., Черниговская М.А., Орлов И.И., Белинская А.Ю., Грехов О.М.* Проявление гравитационных приливов и планетарных волн в долговременных вариациях геофизических параметров // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54. № 4. С. 540–552.
- Юрков Е.Ф., Гумис В.Г.* О связи сейсмичности с фазами приливных волн // *Физика Земли*. 2005. № 4. С. 4–15.
- Beeler N.M., Lockner D.A.* Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: effects of periode stress on the rate and probability of earthquake occurrence // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. No. B8. P. 2391–2405.
- Cartwright D.E., Tayler R.I.* New computations of the tide-generating potential // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1971. V. 23. № 1. P. 45–47.
- Choubey V.M., Arora B.R., Barbosa S.M., Kumar N., Kamra L.* Seasonal and daily variation of radon at 10 m depth in borehole, Garhwal Lesser Himalaya, India // *Applied Radiation and Isotopes*. 2011. V. 69. P. 1070–1078.
- Knopoff L.* Earth tides as triggering mechanism of earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1964. V. 54. P. 1865–1870.
- Marechal J.C., Sarma M.P., Ahmed S.* Establishment of earth tide effect on water-level fluctuations in an unconfined hard rock aquifer using spectral analysis // *Current science*. 2002. V. 83. № 1. P. 61–64.
- Moussa M.M., El-Arabi A.-G.M.* Soil radon survey for tracing active fault: a case study along Qena-Safara road, Eastern Desert, Egypt // *Radiation measurements*. 2003. V. 37. P. 211–216.
- Saraev A.K., Pertel M.I., Malkin Z.M.* Correction of the electromagnetic monitoring data for tidal variations of apparent resistivity // *J. Applied Geophysics*. 2002. V. 8. № 1–2. P. 91–100.
- Shlien S.* Earth-quake-tide correlation // *Geoph. J. Roy. Astron. Soc.* 1972. V. 28. P. 27–34.
- Tanaka S., Masakazu O., Hario S.* Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № B10. P. 2211–2215.
- Wenzel H.-G.* (1994c): Earth tide data processing package ETERNA 3.20 // *Bulletin d'Informations Mareés Terrestres*. Bruxelles. 1994. V. 120. P. 9019–9022.
- Zurbenko I.G., Potrzewa A.L.* Tidal waves in the atmosphere and their effects // *Acta geophysica*. 2009. V. 58. № 2. P. 356–373.