

Разломно-блоковая модель и приливный триггерный механизм сейсмического процесса (на примере сейсмичности Крыма)

© М. М. Довбнич, В. П. Солдатенко, 2010

Национальный горный университет, Днепропетровск,
Украина

Поступила 13 апреля 2009 г.

Представлено членом редколлегии К. Ф. Тяпкиным

На основі розгляду розломно-блокової моделі сейсмічного процесу як системи, що перебуває у близькому до критичного стані, показано, що місячно-сонячні припливи як "тектонічний вібратор" відіграють роль тригерного механізму у сейсмічності. За сумісним аналізом просторово-часових особливостей перебігу сейсмічних подій Криму та результатів моделювання напружено-деформованого стану тектоносфери, спричиненого припливною дією Місяця та Сонця, зроблено висновок про суттєвий вплив припливної вібродії як тригерного механізму на виникнення землетрусу. Для розгляду місячно-сонячних припливів як "тектонічного вібратора" виявляється недостатнім аналіз взаємозв'язку геодинамічних явищ з миттєвими значеннями приливних напружень. Крім того, дуже важливим є урахування особливостей тектонічної будови території досліджень, для якої виконується аналіз взаємозв'язку геодинамічних процесів і місячно-сонячних припливів.

Considering the fault-block model of seismic processes as a system in an unsteady state close to critical it is possible to assume the lunar-solar tides, as a "tectonic vibrator", play the role of trigger mechanism to the seismicity. Based on the complex analysis of seismic events of the Crimea and on the results of tidal stress-deformed state modeling of tectonosphere, caused by the tidal influence of the Moon and the Sun, the conclusion of tidal vibrating of essential influence as triggering mechanism of earthquake has been made. Considering lunar-solar tides as "tectonic vibrator" the interrelation analysis of geodynamic processes and of tidal stresses instantaneous values is not enough. Furthermore, it is very important to take into account the special features of the tectonic structure of region under research, for which the analysis of interrelation of geodynamic processes with the lunar-solar tides is made.

Рассматривая Землю как физическую систему можно утверждать, что планета представляет собой множество элементов, которые могут взаимодействовать между собой и с другими телами. При этом следует понимать, что Земля является самоорганизующейся и саморазвивающейся системой, эволюция которой во многом определяется влиянием космогонических факторов.

Одним из таких факторов, оказывающих постоянное влияние на планету, является приливное воздействие, в первую очередь Луны и Солнца. Вопрос о влиянии лунно-солнечных приливов на геодинамические явления

имеет полутораветковую историю. Впервые вопрос о связи сейсмичности Земли с приливным воздействием Луны и Солнца рассматривался в середине XIX в. французским ученым А. Перре, установившим связь частоты землетрясений с фазами Луны, расстоянием Луны от Земли и ее кульминацией. Позже вопросом влияния приливообразующих сил на сейсмичность занимались многие исследователи. Данные о связи землетрясений с периодическими изменениями приливообразующих сил приводятся Г.П. Тамразяном [Тамразян, 1956], Н.Н. Володичевым, А.Н. Подорольским, Б.В. Левиным, В.А. Подороль-

ским [Володичев и др., 2001], В. А. Николаевым [Николаев, 1996; 2003]. Многие иностранные исследователи также приходят к выводу о существенном влиянии лунно-солнечных приливов на геодинамические, в первую очередь сейсмические, процессы [Hoffman, 1961; Ryall et al., 1968; Heaton, 1975; Polumbo, 1986; Weems et al., 1989; Métivier et al., 2009]. В то же время некоторые авторы не разделяют эту точку зрения [Knopoff, 1964; Simpson, 1967; Shlien, 1972; Rydelek et al., 1992; Tsuruoka et al., 1995; Vidale et al., 1998].

Таким образом, получаемые результаты о связи лунно-солнечных приливов с геодинамическими явлениями неоднозначны и являются спорными по целому ряду вопросов.

Дополнительную информацию о связи геодинамических явлений с лунно-солнечными приливами можно получить на основании совместного анализа пространственно-временных особенностей протекания сейсмических событий и результатов моделирования напряженно-деформированного состояния тектоносферы, вызываемого приливным влиянием Луны и Солнца, так как именно напряженное состояние является одной из важнейших характеристик, определяющих протекание геодинамических процессов.

Ранее [Довбнич, 2007] были рассмотрены методика и результаты оценки напряжений в тектоносфере, обусловленных космогоническими факторами, и в частности — лунно-солнечными приливами. Показано, что максимальные растягивающие напряжения имеют величину $2,24 \cdot 10^4$ Па, сжимающие напряжения — $1,12 \cdot 10^4$ Па, максимальные вертикальные касательные напряжения — $0,42 \cdot 10^4$ Па. Для солнечных приливов максимальные растягивающие напряжения имеют величину $1,03 \cdot 10^4$ Па, сжимающие напряжения — $0,51 \cdot 10^4$ Па, максимальные вертикальные касательные напряжения — $0,19 \cdot 10^4$ Па. На рис. 1 представле-

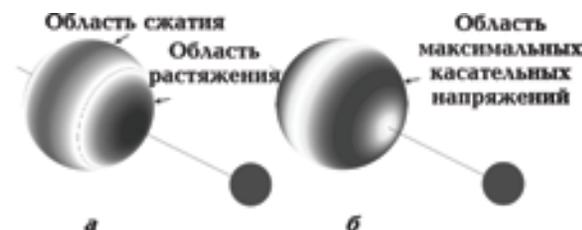


Рис. 1. Схемы приливных полей напряжений: а — сумма нормальных напряжений; б — максимальные касательные напряжения.

на модель напряжений, возникающих в тектоносфере под приливным воздействием.

Несмотря на то что величина рассматриваемых напряжений на несколько порядков меньше напряжений, необходимых для развития геодинамического, в частности сейсмического процесса, их периодичность и скорость накопления позволяют рассматривать лунно-солнечные приливы как "тектонический вибратор" [Шило, Ващилов, 1989], оказывающий роль "спускового крючка". Такой механизм применим к процессам или системам, находящимся в неустойчивом состоянии, близком к критическому, и для которых небольшое изменение критического параметра приводит к резкому изменению протекания процесса.

В настоящей статье сейсмический процесс рассматривается как результат резкого перемещения блоков тектоносферы, возникающий при скачкообразном освобождении энергии упругих деформаций, накопленной под действием планетарного поля напряжений. При этом скачкообразные изменения во многом связаны с триггерным эффектом.

В работах Николаева В. А. [Николаев, 1996, 2003] с позиции триггерного воздействия исследуется влияние приливных сил на разномасштабные и разнообразные сейсмические процессы, глобальную и региональную сейсмичность, на афтершоки сильных землетрясений, а также на горные удары в шахтах.

Как отмечалось, количественный анализ пространственно-временных особенностей распределения напряжений, возникающих под действием Луны и Солнца, позволит ответить на некоторые вопросы.

Важным элементом при расчете приливных напряжений в заданной точке для конкретного момента времени является расчет истинного положения Луны и Солнца, так как величина приливных возмущений, определяющих величину и характер распределения напряжений, может быть оценена в некоторой точке P согласно статической теории приливов на основе выражения [Мельхиор, 1968] $\xi = W / g$, где $g = 9,8204 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения на поверхности сферической Земли; W — приливной потенциал:

$$W = \frac{f m}{2} \frac{a^2}{r^3} \left[3 \cos^2(z) - 1 \right]. \quad (1)$$

Здесь $f = 6,672 \cdot 10^{11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ — гравитацион-

ная постоянная, z — угол между направлениями на точку P и возмущающее тело из центра Земли, r — расстояние между центром Земли и возмущающим телом, a — радиус равновеликой Земле сферы.

Таким образом, на первом этапе задача вычисления лунно-суточных вариаций (приливов, напряжений и т. п.) сводится к вычислению угла z и расстояния r в формуле (1). Подобные вычисления широко известны в астрономических исследованиях [Абалакин, 1981]. Авторами настоящей статьи применен несколько упрощенный подход, учитывающий только основные аномалии в движении Солнца и Луны и достаточный для получения значения z с точностью до десятых долей градуса.

Угол z в формуле (1) можно рассматривать как угловое расстояние между двумя светилами, одно из которых находится в зените точки наблюдения. Это угловое расстояние можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} \cos z = & \sin \delta_z \sin \delta_s + \\ & + \cos \delta_z \cos \delta_s \cos (\alpha_z - \alpha_s), \end{aligned} \quad (2)$$

где α_s, δ_s — соответственно прямое восхождение и склонение для светила, α_z, δ_z — прямое восхождение (долгота) и склонение (широта) для зенита (точки наблюдения). Таким образом, для последующих вычислений необходимо определить координаты Солнца и Луны в экваториальных координатах. В последующих расчетах в качестве эпохи, относительно которой вычисляются положения Солнца и Луны, принята эпоха 1980 г., январь 0,0, что часто используется в астрономии.

Определение экваториальных координат Солнца. Значение расстояния до Солнца задается выражением

$$r = \frac{r_0 (1 - e^2)}{1 + e \cos v}, \quad (3)$$

где $r_0 = 149,5985 \cdot 10^6$ км — большая полуось орбиты Солнца; $e = 0,016718$ — эксцентриситет орбиты Солнца; v — истинная аномалия Солнца (угол, на который Солнце переместилось с момента прохождения через перигей).

Удобным и широко распространенным является первоначальное вычисление координат Солнца в эклиптических координатах (в этом случае его широта равна 0) с последующим переходом к экваториальным. Долгота Солнца в эклиптических координатах равна

$$\lambda_0 = v + \omega_g, \quad (4)$$

где $\omega_g = 282,596403^\circ$ — долгота Солнца в перигее. Истинную аномалию Солнца можно определить следующим образом:

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \left(\frac{1 + e}{1 - e} \right)^2 \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \quad (5)$$

где E — эксцентрическая аномалия, получаемая из решения уравнения Кеплера:

$$E - e \sin E = M, \quad (6)$$

M — средняя аномалия Солнца, определенная в предположении, что Солнце движется по круговой орбите:

$$M = \frac{360}{365,2422} D + \varepsilon_g - \omega_g, \quad (7)$$

D — число суток, прошедших с начала эпохи 1980 г.; $\varepsilon_g = 278,833540^\circ$ — эклиптическая долгота Солнца на начало эпохи 1980 г. Уравнение (6) решается методом последовательных приближений.

Переход от эклиптических координат (долготы λ и широты β) к экваториальным (прямому восхождению α и склонению δ) осуществляется по формулам

$$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\sin \lambda \cos \varepsilon - \operatorname{tg} \beta \sin \varepsilon}{\cos \lambda} \right),$$

$$\delta = \operatorname{arc} \sin (\sin \beta \cos \varepsilon + \cos \beta \sin \varepsilon \sin \lambda),$$

где ε — наклон эклиптики:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 23^\circ 27' 08,26'' - 46,845'' T - \\ & - 0,0059'' T^2 + 0,001811'' T^3, \end{aligned} \quad (8)$$

T — число юлианских веков, прошедших с эпохи 1900 г.

Определение экваториальных координат Луны. Используем упрощенный метод нахождения положения Луны, учитывающий только основные возмущения орбиты спутника Земли.

Орбита Луны существенно возмущена влиянием не только Земли, но и Солнца. Причем влияние последнего существеннее. Можно выделить три основных эффекта солнечных возмущений на видимую лунную орбиту вокруг

Земли. Первый из них называется эвекцией и состоит в том, что видимая величина эксцентриситета лунной орбиты немного изменяется. Второй эффект обусловлен изменением расстояния между Землей и Солнцем по мере того, как Земля движется по эллипсу вокруг Солнца. Соответствующие поправки называются годичным уравнением. Третий эффект возникает из-за движения Луны в гравитационном поле Солнца. Когда Луна находится по ту же сторону от Земли, что и Солнце, притяжение Солнца немного больше, чем когда Луна находится по другую сторону от Земли. Соответствующая поправка называется вариацией. Все эти поправки вместе обычно называют уравнением центра.

Этапы вычисления положения Луны следующие. Находим ее истинную орбитальную долготу l'' :

$$l'' = l' + V, \quad (9)$$

где V — вариация, l' — исправленная долгота:

$$l' = l + E_0 + E_c - A_e + A_4, \quad (10)$$

$A_4 = 0,214 \sin 2M'_m$ — поправка для средней аномалии Луны; $E_c = 6,2886 \sin M'_m$ — поправка за уравнение центра; $E_0 = 1,2739 \sin (2C - M_m)$ — поправка за эвекцию; $A_e = 0,1858 \times \sin M$ — годичная поправка; M — средняя аномалия Солнца; $C = l - \lambda_0$; $l = 13,176396D + l_0$ — средняя долгота Луны.

Находим исправленную среднюю аномалию Луны M'_m :

$$M'_m = M_m + E_0 - A_e - A_3, \quad (11)$$

где $A_3 = 0,37 \sin M$ — поправка для исправленной средней аномалии Луны; $M_m = -0,1114041D - P_0$ — средняя аномалия Луны.

Переходим к эклиптическим координатам:

$$\lambda_m = \arctg \left[\frac{\sin (l'' - N') \cos i}{\cos (l'' - N')} \right] + N',$$

$$\beta_m = \arcsin \left[\sin (l'' - N') \sin i \right],$$

где $N' = N - 0,16 \sin M$ — исправленная долгота восходящего узла; $N = N_0 - 0,0529539D$ — средняя долгота восходящего узла; $l_0 = 64,975464^\circ$; $P_0 = 349,383063^\circ$; $N_0 = 151,950429^\circ$ — средние значения долгот на начало эпохи 1980 г.

Расстояние до Луны определяется по формуле

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos (M'_m + E_c)}, \quad (12)$$

где $e = 0,054900$ — эксцентриситет орбиты Луны; $a = 384401$ км — большая полуось орбиты Луны.

Формулы (1) — (12) позволяют вычислить приливные лунно-солнечные вариации для любой точки поверхности Земли, на основании которых, согласно алгоритму, рассмотренному ранее [Довбнич, 2007], возможен расчет полей напряжений. В качестве примера на рис. 2 приведены расчетные кривые лунно-солнечных приливных возмущений и возникающих при этом напряжений.

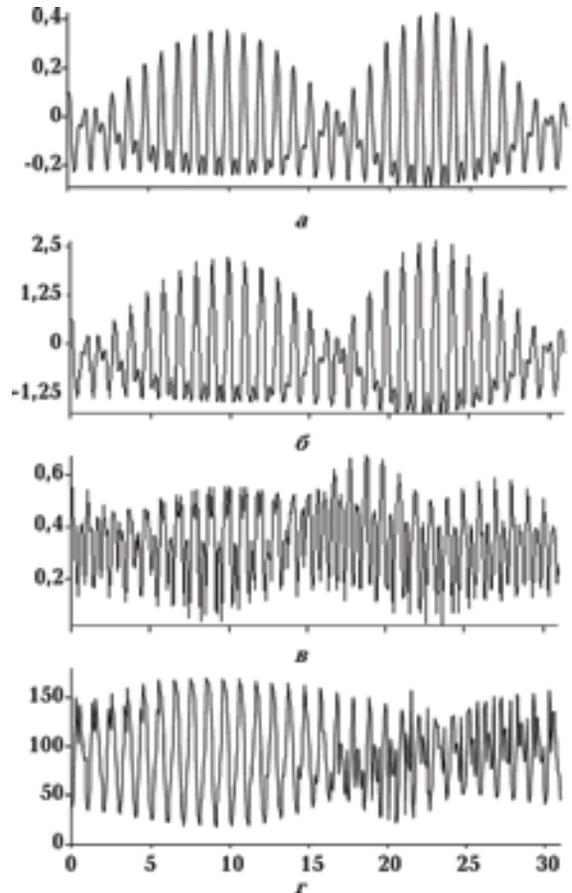


Рис. 2. Расчетные кривые приливных суммарных лунно-солнечных вариаций (m) (а), напряжений сжатия—растяжения (10^4 Па) (б), максимальных вертикальных касательных напряжений (10^4 Па) (в), азимутов площадок действия максимальных вертикальных касательных напряжений (град.) в точке ($\varphi = 48^\circ$ с. ш., $\lambda = 37^\circ, 5$ в. д.) в течение декабря 2007 г. (г).

Рассматривая лунно-солнечные приливы как "тектонический вибратор" и учитывая величины возникающих напряжений, оказывается недостаточным анализ взаимосвязи геодинамических явлений с мгновенными значениями приливных напряжений. Необходим расчет и анализ интегральных характеристик, определяющих действие рассматриваемого "тектонического вибратора" в течение значительных промежутков времени. По мнению авторов, одной из таких характеристик может выступать сумма среднесуточных напряжений, а принимая во внимание, что подвижки блоков тектоносферы и связанные с ними сейсмические процессы обусловлены касательными напряжениями — сумма среднесуточных максимальных касательных напряжений.

Следует отметить, что наряду с величиной приливных касательных напряжений важное значение имеет ориентировка площадки, на которой эти напряжения действуют. Естественно, азимуты площадок будут изменяться во времени в соответствии с изменением положения Луны и Солнца относительно точки на земной поверхности. При этом если на территории исследования имеется зона нарушения сплошности среды, то очевидно, что наибольшее триггерное воздействие на геодинамические процессы будут оказывать касательные напряжения, азимуты площадок действия которых совпадают или близки к азимуту зоны нарушения сплошности. На рис. 3 схематически показана зависимость амплитуды взаимного перемещения блоков от положения их границы к направлению приливного воздействия, а фактически от азимута площадок, на которых действуют максимальные вертикальные касательные напряжения.

В настоящей статье выполнен анализ связи землетрясений Крыма с приливными напряжениями, рассчитанными в интервале времени с 1960 по 1991 гт. Данные о землетрясениях взяты из электронных каталогов Мирового центра данных по физике твердой Земли и Института физики Земли, имеющих в свободном доступе в сети INTERNET. Каталог



Рис. 3. Схема перемещений блоков тектоносферы при приливном воздействии.

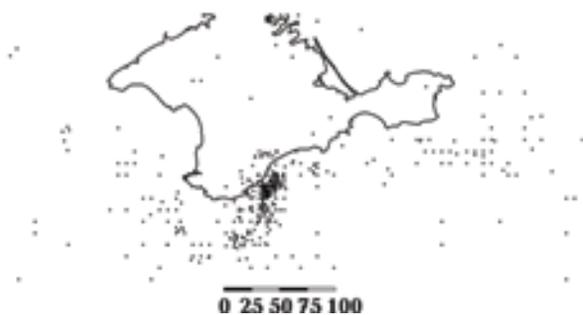


Рис. 4. Схема эпицентров землетрясений Крыма с 1962 по 1989 гг.

содержит информацию о 664 сейсмических событиях, произошедших в период с 1962 по 1989 гт. На рис. 4 показаны эпицентры землетрясений по материалам данного каталога.

Крымский регион является частью Крымско-Кавказского сейсмоактивного сегмента Альпийско-Гималайского пояса. Ранее [Довбнич, 2008; Довбнич, Демьянец, 2009] рассмотрены основные положения методики и результаты оценки напряжений в тектоносфере, обусловленных нарушением геоизостазии для территории Азово-Черноморского региона. На основе анализа геоизостатических полей напряжений рассмотрены возможные модели формирования и геологического развития региона. Показано, что в напряжениях находят отражение элементы, являющиеся тектонической основой сейсмогенерирующих структур. Именно с этими напряжениями, а фактически с границами блоков, связано большинство сейсмических событий. Рассмотрена разломно-блоковая модель сейсмических процессов Крымского региона. Показано, что в целом сейсмичность данного региона определяется разломной зоной, по которой происходит опускание блоков Черноморской впадины; особенности расположения очагов землетрясений в пределах данной зоны определяются границами взаимодействия ее отдельных фрагментов — тектонических блоков более мелкого порядка. При этом наибольшее количество землетрясений происходит в звене сейсмогенной зоны, имеющем северо-восточное простирание.

Исследования выполнялись в два этапа. Первоначально было выполнено моделирование полей напряжений в тектоносфере Крымского региона, возникающих вследствие приливного воздействия Луны и Солнца для периода с 1962 по 1989 гт. При проведении настоящих исследований выполнялась азиму-

тальная селекция касательных напряжений. В процесс анализа вовлекались касательные напряжения, азимуты площадок которых за рассматриваемый промежуток времени были в интервале 20—50°. Для изучения интегральных характеристик лунно-солнечного приливного воздействия в течение значительных промежутков времени был выполнен расчет кривой суммы среднесуточных максимальных касательных напряжений за сидерический месяц. Расчет амплитудного спектра кривой суммы среднесуточных максимальных касательных напряжений за сидерический месяц после азимутальной фильтрации свидетельствует о наличии четырех максимумов, соответствующих гармоникам с периодом год, полгода, четыре и три месяца (рис. 5, а).

Впоследствии для территории Крымского региона изучалась кривая числа сейсмических событий с 1962 по 1989 гг., произошедших в течение сидерического месяца. Как и при исследовании временных особенностей напряженного состояния, для изучения скрытых периодичностей кривой числа землетрясений применялся спектральный анализ. Амплитудный спектр кривой числа сейсмических событий, произошедших в течение сидерического месяца с 1962 по 1989 гг., для территории Крымского региона представлен на рис. 5, б. Характерно, что в амплитудном спектре отмечается четыре основных максимума, соответствующие периодам максимумов в амплитудном спектре кривой приливных касательных напряжений после азимутальной селекции (см. рис. 5, а). При этом соотношение амплитуд максимумов в спектре кривой землетрясений близко к соотношению амплитуд максимумов в спектре кривой приливных касательных напряжений.

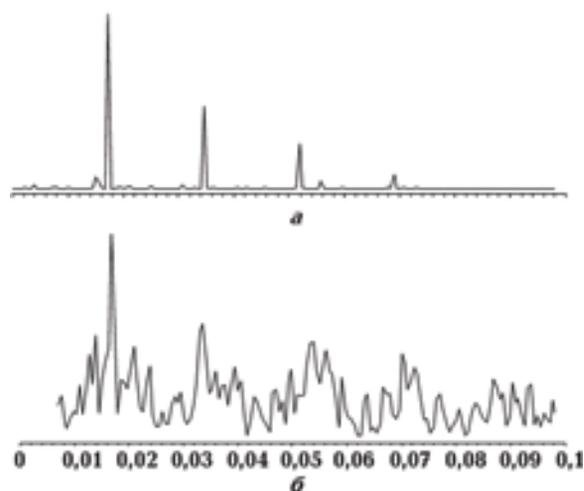


Рис. 5. Амплитудные спектры (по оси x — круговая частота $\omega = 2\pi/T$, T — период в днях) кривой суммы среднесуточных максимальных касательных напряжений за сидерический месяц для территории Крыма после азимутальной селекции (а) и кривой числа сейсмических событий Крыма, произошедших в течение сидерического месяца с 1962 по 1989 гг. (б).

литуд максимумов в спектре кривой приливных касательных напряжений.

Подобные закономерности позволяют утверждать о существенном влиянии приливного вибровоздействия как триггерного механизма при возникновении землетрясения. Кроме того, становится очевидной необходимость учета особенностей тектонического строения территории исследования, для которой выполняется анализ взаимосвязи геодинамических процессов с лунно-солнечными приливами.

Список литературы

- Абалакин В. К. *Астрономический календарь. Постоянная часть.* — Москва: Наука, 1981. — 704 с.
- Володичев Н. Н., Подорольский А. Н., Левин Б. В., Подорольский В. А. Корреляция появления крупных серий землетрясений со временем фаз новолуния и полнолуния // *Вулканология и сейсмология.* — 2001. — № 1. — С. 60—67.
- Довбнич М. М. Влияние вариаций ротационного режима Земли и лунно-солнечных приливов на напряженное состояние тектоносферы // *Доп. НАН України.* — 2007. — № 11. — С. 105—112.
- Довбнич М. М. Оценка влияния космогонических факторов на напряженное состояние тектоносферы // *Наук. Вісник Нац. гірничого ун-ту.* — 2007. — № 4. — С. 34—42.
- Довбнич М. М. Нарушение геоизостазии и напряженное состояние тектоносферы // *Геофиз. журн.* — 2008. — 30, № 4. — С. 123—132.

- Довбнич М. М., Демьянец С. Н. Поля напряжений тектоносферы, обусловленные нарушением геоизостазии и геодинамика Азово-Черноморского региона // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 2. — С. 107—116.
- Мельхиор П. Земные приливы. — Москва: Мир, 1968. — 482 с.
- Николаев В. А. Связь сейсмичности с фазами кратных и разностных приливных волн // ДАН. — 1996. — **349**, № 3. — С. 389—394.
- Николаев В. А. Исследование напряженного состояния литосферы на основе анализа связи земных приливов и сейсмичности. — Москва: Б. и., 2003. — 236 с.
- Тамразян Г. П. Землетрясения в Приказбекском районе и упругие приливы // Изв. АН СССР. Сер. геологич. — 1956. — № 7. — С. 841—842.
- Шило Н. А., Ващиллов Ю. Я. Земные приливы как тектонический насос и вибратор // Докл. АН СССР. — 1989. — **307**, № 4. — С. 833—836.
- Heaton T. H. Tidal triggering of earthquakes // Geophys. J. Roy. Astronom. Soc. — 1975. — **43**. — P. 307—326.
- Hoffman R. B. Aftershock-energy release versus tidal effects, Hebgen Lake earthquake, Montana // US Geol. Surv. Prof. Paper. — 1961. — P. 267—270.
- Knopoff L. Earth tides as triggering mechanism for earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. — 1964. — **54**. — P. 1865—1870.
- Métivier L., de Viron O., Conrad C. P., Renault S., Diamant M., Patau G. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides // Earth Planet. Sci. Lett. — 2009. — **278**. — P. 370—375.
- Polumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy // Geophys. J. Roy. Astronom. Soc. — 1986. — **84**. — P. 93—99.
- Ryall F., Van Wormen J. D., Jones A. E. Triggering of microearthquakes by Earth tides, and other futures of the Truckee // Bull. Seismol. Soc. Amer. — 1968. — **58**. — P. 215—248.
- Rydelek P. A., Sacks I. S., Scarpa R. On tidal triggering of earthquakes at Campi Flegrei, Italy // Geophys. J. Int. — 1992. — **109**. — P. 125—137.
- Shlien S. Earthquake-tide correlation // Geophys. J. Roy. Astronom. Soc. — 1972. — **28**. — P. 27—34.
- Simpson J. F. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes // Earth Planet. Sci. Lett. — 1967. — **2**. — P. 473.
- Tsuruoka H., Ohtake M., Sato H. Statistical test of the tidal triggering of earthquakes: contribution of the ocean tide loading effect // Geophys. J. Int. — 1995. — **122**. — P. 183—194.
- Vidale J. E., Agnew D. C., Johnston M. J., Oppenheimer D. H. Absence of earthquake correlation with Earth tides: an indication of high preseismic fault stress rate // J. Geophys. Res. — 1998. — **103**. — P. 24567—24572.
- Weems R. E., Perry W. H. Strong correlation of major earthquakes with solid-earth tides in part of the eastern United States // Geology. — 1989. — **17**. — P. 661—664.