

УДК 550.3: 523.31

## РЕГИОНАЛЬНЫЙ ОТКЛИК ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИЛИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

© 2022 г. А. В. Мясников<sup>1,\*</sup>, член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич<sup>2</sup>, Д. В. Лиходеев<sup>2</sup>

Поступило 12.11.2021 г.  
После доработки 15.12.2021 г.  
Принято к публикации 16.12.2021 г.

Представлены результаты многолетних экспериментальных наблюдений приливных деформаций земной коры, полученные с помощью уникального лазерного интерферометра ГАИШ МГУ в штольне Баксанской нейтринной обсерватории. Проанализирован пятнадцатилетний ряд непрерывных натурных наблюдений литосферных деформаций и соответствующих теоретических расчетных значений прилива с выделением главной лунной волны  $M_2$ . На основе полученных данных исследованы особенности реакции ограниченного объема слоистой геофизической среды на приливное воздействие, проанализированы изменения ее амплитудных и фазовых параметров с учетом закономерностей протекания сейсмического процесса. Рассмотрены возможности использования определяющих параметров приливного отклика геофизической среды в качестве возможных индикаторов процесса формирования и развития очаговых структур региональных сейсмических событий.

*Ключевые слова:* лунно-солнечный прилив, амплитудные и фазовые параметры, напряженно-деформированное состояние, региональная сейсмичность

DOI: 10.31857/S2686739722040144

Современные представления о геодинамике Кавказа свидетельствуют в пользу его расширения в субширотном и сжатии в субмеридиональном направлениях на фоне общего поднятия региона, сопровождающегося закономерными проявлениями сейсмических и вулканических процессов, которые могут стать причиной возникновения и развития разномасштабных природно-техногенных катастроф, создающих в свою очередь угрозу безопасности жизнедеятельности в пределах горных территорий юга России и их рекреационному потенциалу. Отметим, что исследования последних лет охватывают широкий круг задач, ответственных за развитие катастрофических событий на Северном Кавказе [15, 16].

Сама по себе идея наблюдений за изменениями реакции геофизической среды на лунно-солнечный прилив далеко не нова [4, 18], по сути – достоверная информация о параметрах внешнего силового воздействия однозначно определяется расчетом теоретического прилива, а результаты

наблюдений приливной деформации непосредственно на земной поверхности позволяют оценить влияние локальных неоднородностей геологической среды, проявляющееся в отклонениях наблюдаемых значений литосферных деформаций от расчетных.

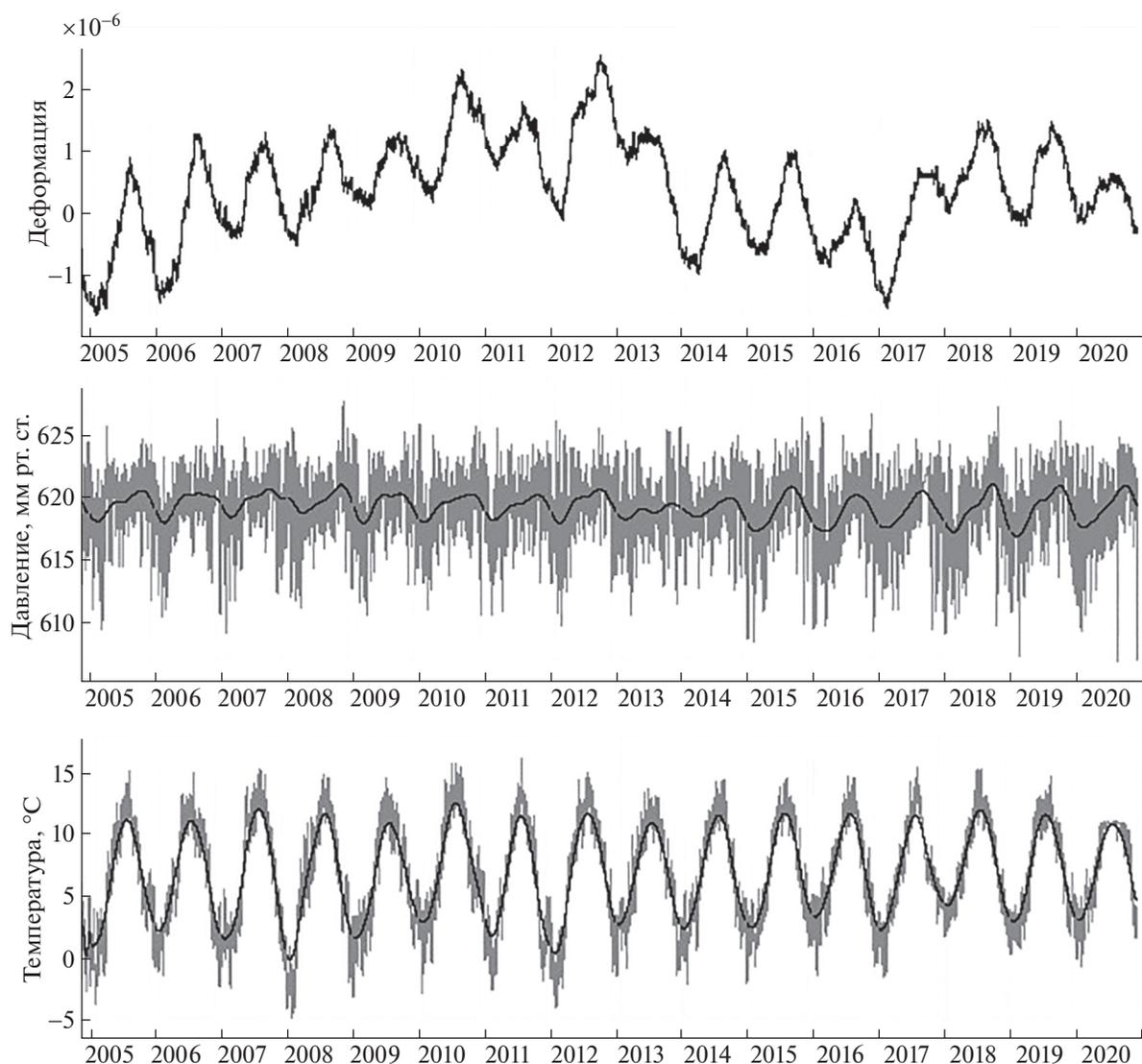
Таким образом, в качестве “входного сигнала” рассматривается теоретический прилив, определяемый законами небесной механики и стандартной моделью глубинного строения Земли [19]. При этом расчеты проводятся, как правило, с помощью стандартного пакета ETGTAB, входящего в состав программного комплекса ETERNA [20]. Сигнал же “на выходе” или отклик слоистой геофизической среды определяется в результате обработки временных рядов значений литосферных деформаций, регистрируемых с помощью уникального интерферометра-деформографа ГАИШ МГУ, расположенного в штольне “Главная” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Лазерный интерферометр-деформограф представляет собой прецизионный оптический прибор – двухпроходной неравноплечий интерферометр Майкельсона, работающий в режиме разнесенных пучков [7]; длина большого измерительного плеча, ориентированного в азимуте  $150^{\circ}37'$  составляет 75 м, опорного – 0.3 м; относительная чувствительность измерения литосферных деформаций –  $2.3 \times 10^{-13}$ ; рабочий диапазон частот

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: andrey0405@mail.ru



**Рис. 1.** Экспериментальные данные, зарегистрированные с 2004 по 2020 г. Баксанском лазерным интерферометром-деформографом ГАИШ МГУ, сверху – вниз: литосферная деформация (стрейн) вдоль измерительного плеча (75 м), атмосферное давление и температура в точке установки прибора (штольня “Главная” БНО ИЯИ РАН). Черные линии (атмосферное давление, температура) показывают сезонные вариации.

от 0 до 15 Гц, динамический диапазон неограничен [6]. Основная задача данного геофизического инструмента – регистрация реакции Земли (вариации фигуры Земли) на лунно-солнечный прилив (рис. 1).

На рис. 1 (верхняя панель) представлен лунно-солнечный прилив на фоне вариации сезонной температуры [14]. На верхнем графике заметна длиннопериодная составляющая деформации, величина которой на полтора порядка превышает амплитуду приливного отклика. Так, с 2004 по 2010 г. относительная деформация составляет  $3 \times 10^{-6}$ , что соответствует абсолютному растяжению земной коры в пересчете на 100 км порядка 0.3 м, или около 5 см в год в направлении указан-

ного выше азимута. Однако уже с 2012 г. наблюдается относительное сжатие в регионе, а далее ход длиннопериодной вариации незначителен.

Лунно-солнечный прилив имеет два основных приливных диапазона – суточный и полусуточный, каждый из которых состоит из восьми ( $J_1, K_1, S_1, P_1, P_{i1}, M_1, O_1, Q_1$ ) и десяти ( $K_2, S_2, T_2, L_2, i_2, M_2, V_{i2}, N_2, Mu_2, 2N_2$ ) основных приливных лунных и солнечных гармоник. Все основные солнечные приливные гармоники искажены вариацией метеорологических параметров, что полностью исключает их из дальнейшего анализа. Кроме того, волны  $J_1, K_1, S_1, P_1, P_{i1}$  подвержены эффекту близсуточного резонанса жидкого ядра Земли [9, 11]. В итоге из всего набора приливных

волн для целей настоящего исследования будет использована главная лунная волна  $M_2$  (период  $T = 12.40601$  ч), не подверженная влиянию термоупругих деформаций и характеризуемая высоким отношением сигнал/шум [14]. Вместе с этим  $M_2$  чувствительна к вариациям атмосферного давления. Для вычисления атмосферного нагрузочного эффекта использовалась программа ATMDEFORM 1.0\_2019 [17], а для частичной компенсации океанической нагрузки нами была использована модель OCENAP [10].

Известно, что наблюдаемые приливные деформации земной коры в Приэльбрусье [8] могут существенно отличаться от теоретических вследствие наличия в земной коре локальных неоднородных включений и глубинных тектонических разломов, отклонения упругих характеристик реальной геофизической среды от используемой модели, а также существенными особенностями рельефа [13]. В общем случае реакция исследуемого объема геофизической среды на внешнее действие определяется соотношением:

$$\frac{S_{\text{ВЫХ}}(\omega)}{S_{\text{ВХ}}(\omega)} = W, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ВЫХ}}(\omega)$ ,  $S_{\text{ВХ}}(\omega)$  – преобразования Фурье от сигналов на выходе  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  и входе  $U_{\text{ВХ}}(t)$  упругой механической среды соответственно,  $W$  – комплексная передаточная функция, определяющая изменение амплитуды и сдвиг фазы на выходе, относительно входного сигнала на определенной частоте. Будем рассматривать теоретический прилив в качестве опорного сигнала по отношению к наблюдаемому приливу, без учета статического отличия приливных параметров. Таким образом, в тригонометрической форме имеем:

$$W = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}} (\cos(\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}}) + i \sin(\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}})), \quad (2)$$

где  $A_{\text{ВЫХ}}$ ,  $A_{\text{ВХ}}$ ,  $\varphi_{\text{ВЫХ}}$ ,  $\varphi_{\text{ВХ}}$  – амплитуды и фазы сигналов на выходе и входе системы соответственно. При условии малости запаздывания фазы можно представить (2) в следующем виде [1]:

$$W \approx \frac{A_{\text{ВЫХ}}/A_{\text{ВХ}}}{1 - i\Delta\varphi}, \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}}) \ll 1$  – запаздывание фазы прилива реальной геофизической среды.

Соотношение (3) дает представление о физическом смысле параметров передаточной функции, в числителе которой находится коэффициент усиления для “нулевых” частот, который естественно интерпретировать как величину, пропорциональную коэффициенту всестороннего сжатия  $K$ , в то время как “фазовый параметр”  $\varphi$  определяет временную характеристику  $T = \varphi/\omega$ , где  $\omega$  – частота, соответствующая периоду опре-

деленной приливной волны. Параметр  $T$  определяет характерное время переходного процесса в механической системе или время запаздывания на частоте  $\omega$ .

Исследованиями В.Н. Жаркова [2, 3] и С.М. Молоденского [12] было показано, что фазовые запаздывания приливов обусловлены неупругими свойствами геофизической среды и проявляются, в основном, через динамический модуль сдвига. Таким образом, с учетом перечисленных допущений, можно предположить наличие взаимосвязи вариаций “амплитудного параметра” ( $A_{\text{ВЫХ}}/A_{\text{ВХ}}$ ) с изменениями коэффициента всестороннего сжатия среды  $K$ , а “фазового параметра” – с изменениями модуля сдвига  $\mu$ . Последнее допущение справедливо при условии, что запаздывание приливной волны составляет первые проценты от ее периода. Из выражения (3) следует, что коэффициент сжатия качественно определяется действительной частью  $W$  (или амплитудным параметром), а модуль сдвига соответственно ее мнимой частью (или фазовым параметром), т.е.  $K \sim \text{Re}(W)$ ,  $\mu \sim \text{Im}(W)$ . Таким образом, задача сводится к вычислению параметров передаточной функции, используя расчетный теоретический прилив в точке наблюдения, и реальные данные лазерного деформографа. Естественно предположить, что полученные величины будут непостоянны во времени, отражая изменения напряженно-деформированного состояния исследуемого объема слоистой геофизической среды.

Поскольку значения упругих коэффициентов при высоком уровне тектонических напряжений в среде (в состоянии предразрушения) зависят от величин этих напряжений [12], можно также предположить, что изменения напряженно-деформированного состояния геофизической среды относительного фонового (высокого) уровня будут проявляться в соответствующих вариациях значений упругих параметров. Используя для качественной оценки их значений определенные выше компоненты передаточной функции  $W$ , представляется возможным проследить их взаимную корреляцию и тем самым проследить качественные изменения величин, накопленных в исследуемом объеме земной коры тектонических напряжений.

В качестве независимого, хотя и косвенного индикатора накопившихся напряжений, могут быть привлечены энергетические характеристики региональной сейсмичности. Действительно, согласно теории упругой отдачи, процесс развития землетрясения проходит ряд этапов, например, в модели Касахара определены четыре стадии сейсмического цикла: межсейсмическая, предсейсмическая, косейсмическая и постсейсмическая. Первая характеризуется накоплением

потенциальной энергии; вторая – неупругим поведением геофизической среды при критическом уровне напряжений; косейсмическая стадия – это переход потенциальной энергии в кинетическую, а постсейсмическая – достижение системой нового равновесного состояния. Поскольку энергия землетрясения однозначно связана с его магнитудой [2], то далее, согласно теории упругой отдачи, оценка выделившейся сейсмической энергии по совокупности всех сейсмических событий в некоторой ограниченной области позволяет оценить уровень накопленных тектонических напряжений за определенный промежуток времени.

Далее, на основе данных регионального каталога сейсмических событий Приэльбрусья, рассмотрим взаимосвязь процессов разгрузки тектонических напряжений с изменениями значений корреляции между амплитудным и фазовым параметрами передаточной функции  $W$  для диапазона периодов приливной волны  $M_2$ .

На первом этапе, из шестнадцатилетнего непрерывного ряда наблюдений литосферой деформации [5] в диапазоне периодов 12.36–12.48 ч с помощью импульсного симметричного фильтра с конечной областью отклика выделялась приливная волна  $M_2$ . Аналогично проводилась и обработка данных расчета полного теоретического прилива для выделения опорной волны  $M_2^*$ . Определив значения  $U_{\text{вых}}(t)$  и  $U_{\text{вх}}(t)$  во временной области, посредством преобразования Фурье методом плавающего окна Ханна с шагом 24 ч, получаем искомые амплитудный ( $A_{\text{вых}}/A_{\text{вх}}$ ) и фазовый ( $\varphi = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$ ) параметры передаточной функции.

На рис. 2 представлены графики изменений во времени амплитудного и фазового параметров  $\varphi$  волны  $M_2$  с шагом 24 ч. Видно, что колебания амплитудного параметра на протяжении 15 лет происходили в диапазоне 0.85–1.11 единиц, при этом отклонения от среднего значения не превышали 15%. В то же время изменения фазового параметра волны  $M_2$  относительно ее периода составляли порядка 400 с или 0.009 периода, что позволяет считать  $\varphi$  малой величиной.

Согласно региональному каталогу землетрясений Геофизической службы РАН, за весь период деформометрических наблюдений в радиусе 55 км от места установки лагерного деформографа произошло не менее трехсот событий с магнитудами от 0.1 до 4.0, при этом подавляющее большинство эпицентров было расположено к востоку и северо-востоку от точки измерений.

Соответствующая гистограмма выделившейся сейсмической энергии в последовательных, шестидесяти суточных интервалах времени представлена на рис. 2 (нижний график). На гисто-

грамму наложена кривая изменения значений корреляции амплитудного и фазового параметров передаточной функции (3).

Последняя построена методом плавающего окна шириной 300 сут, сдвигом  $\pm 30$  сут в каждой точке и шагом одни сутки. То есть, последовательно, с периодом один день, вырезалось окно шириной 300 сут из временного ряда амплитудного параметра. Соответственно, из временного ряда фазового параметра также вырезалось трехсотсуточное окно и с пошаговым сдвигом сначала вправо на 30 дней, а затем влево на 30 дней, определялось максимальное значение коэффициента корреляции между этими окнами. Максимальное значение внутри интервала  $\pm 30$  дней принималось за значение коэффициента корреляции на данном интервале, в противном случае он приравнивался нулю. Такой же алгоритм был использован и для поиска отрицательных значений корреляционной функции.

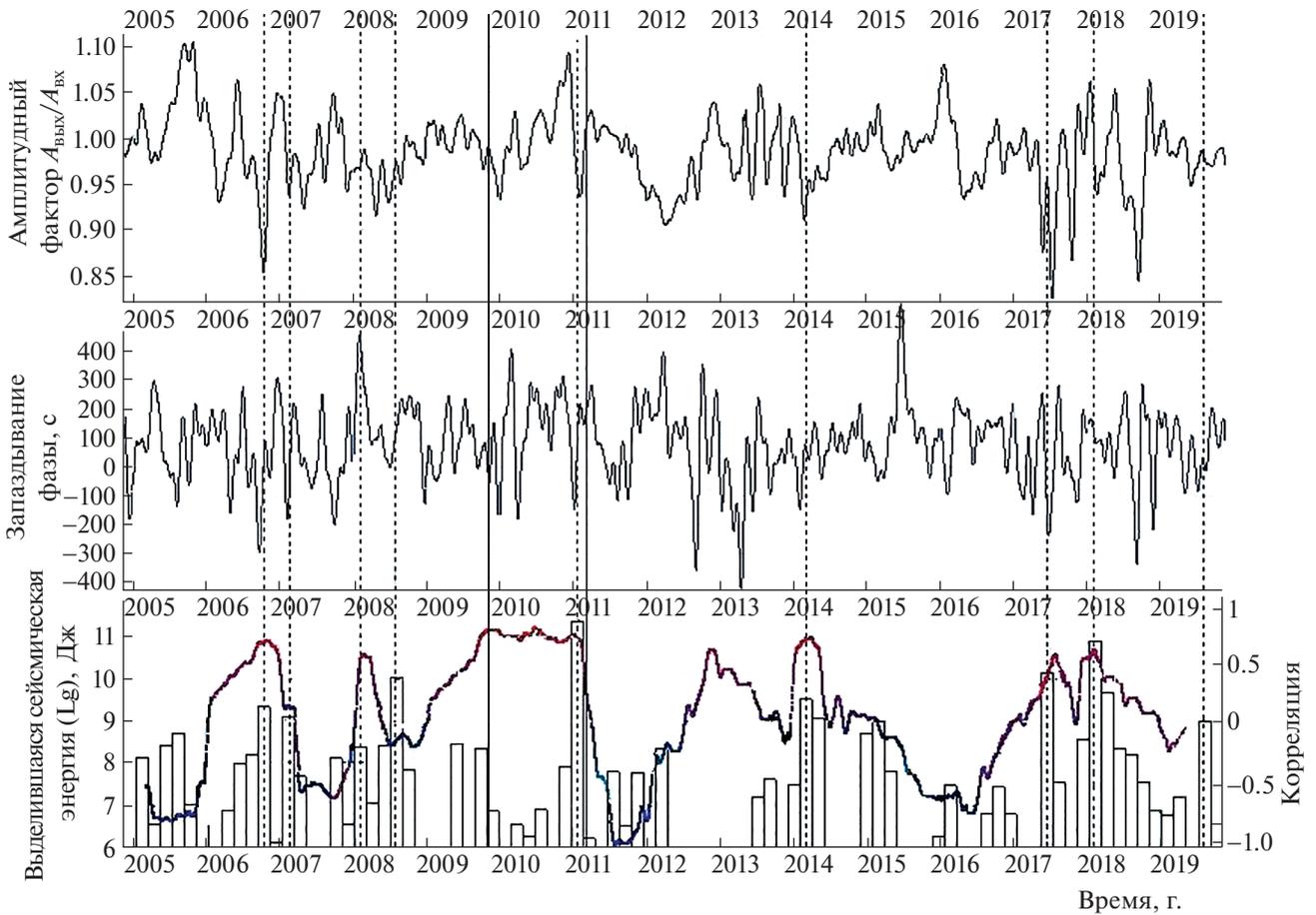
Полученные значения были определены в диапазоне от  $-0.89$  до  $+0.86$ . В результате значения корреляции и антикорреляции, дополняя друг друга, позволили построить практически непрерывную кривую.

Заметное уменьшение значений корреляции амплитудного и фазового параметров в периоды высокой сейсмической активности наблюдается в 2006, 2007, 2008 (первая половина), 2011 и 2014 гг. Рассмотрим более подробно начало 2011 г., поскольку в этот период, впервые за 16 лет непрерывного мониторинга деформации литосферы в Приэльбрусье, удалось наблюдать процесс формирования и развития очага в верховьях р. Малка, результатом которого стали два сейсмических события 04.11.2011 г. с интервалом в 9 мин и магнитудами  $\sim 4.0$ , произошедшие на удалении не более 10 км друг от друга, при этом суммарная выделившаяся энергия составила  $\sim 10^{11}$  Дж.

Если рассматривать кривую корреляции (рис. 2) в качестве индикатора накопления тектонических напряжений в исследуемой области, то можно предположить, что очаг землетрясения формировался в течение как минимум полутора лет, со второй половины 2009 г. и в относительно спокойной сейсмической обстановке на протяжении 2010 г. Этот фрагмент выделен на рис. 2 вертикальными линиями. На рис. 3 более детально показан ход изменений амплитудного и фазового параметров с конца 2009 до начала 2011 г., амплитуды вариаций нормированы.

Первое, что необходимо отметить: по мере приближения сейсмического события наблюдается устойчивое соответствие вариаций значений двух анализируемых параметров.

Второе обстоятельство касается гистограммы и связано с размером области, в которой учитываются сейсмические события. Упомянутый ранее



**Рис. 2.** Временные зависимости амплитудного (верхний график) и фазового (средний график) параметров волны  $M_2$ . На нижнем графике представлены изменения во времени значений корреляции амплитудного и фазового параметров на фоне гистограммы выделившейся сейсмической энергии землетрясений (в шестидесятисуточных интервалах), эпицентры которых находились на удалении не более 55 км от точки расположения лазерного деформографа.



**Рис. 3.** Совмещенные нормированные графики амплитудного ( $Re(W)$  – серая прерывистая линия) и фазового ( $Im(W)$  – черная линия) параметров за период с ноября 2009 по февраль 2011 г. Вертикальными линиями отмечены – начало 2010 и 2011 г. и момент землетрясения 04.11.2011 г.

радиус в 55 км от точки наблюдения был определен эмпирически, путем постепенного расширения зоны, которая “контролируется” деформационным приливным методом.

Наконец, по данным регистрации относительной деформации можно заключить, что относительно очага событий 2011 г. лазерный интерферометр-деформограф находился в зоне растяжения.

Таким образом, для качественной оценки уровня накопленных тектонических напряжений в выделенном объеме слоистой геофизической среды посредством оценки лунно-солнечного приливного отклика необходимо использовать только главную лунную волну  $M_2$ , выделяя последнюю в достаточно узком частотном диапазоне. Временные вариации параметров этой волны следует вычислять относительно теоретического значения соответствующей волны, прошедшей идентичную математическую обработку при выделении ее из общего теоретического прилива.

Представляется недостаточным для анализа приливного отклика делать оценку вариации лишь амплитудного параметра, поскольку фазовый параметр приливной волны несет не менее важную информацию об изменениях напряженно-деформированного состояния слоисто-неоднородных структур земной коры.

Предлагаемое направление дальнейших исследований не рассматривает главной целью поиск подходов к решению проблемы краткосрочного прогноза землетрясений. В качестве основной задачи, помимо представления результатов анализа многолетних обсерваторских наблюдений литосферных деформаций, предполагается на основе исследования приливного отклика геофизической среды продемонстрировать возможность наблюдения процессов формирования и развития очаговых структур региональных сейсмических событий.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников обсерватории, инженеров Н.А. Перельгина и С.В. Гирина за техническую поддержку работы Баксанского лазерного интерферометра.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00341.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бессекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1979. 765 с.
2. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
3. *Жарков В.Н., Паньков В.Л.* Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1968. 326 с.
4. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 483 с.
5. *Миллюков В.К., Мясников А.В.* Долговременные наблюдения литосферных деформаций Баксанским лазерным интерферометром в условиях подземного размещения // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 32–35.
6. *Миллюков В.К., Мясников А.В.* Влияние термоупругих и барических процессов на измерения литосферных деформаций Баксанским лазерным интерферометром // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 44–47.
7. *Миллюков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н.* Лазерный интерферометр–деформограф для мониторинга движений земной коры // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 87–103.
8. *Миллюков В.К., Конаев А.В., Лагуткина А.В., Мионов А.П., Мясников А.В.* Наблюдения приливных деформаций земной коры в Приэльбрусье // Физика Земли. 2007. № 11. С. 21–29.
9. *Миллюков В.К., Кравчук В.К., Мионов А.П., Латынина Л.А.* Деформационные процессы в литосфере, связанные с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли. 2011. № 3. С. 96–109.
10. *Миллюков В.К., Аморузо А., Кресчетини Л., Мионов А.П., Мясников А.В., Лагуткина А.В.* Океаническая нагрузка и локальные возмущения на деформационных станциях Баксан (Россия) и Гран-Сасо (Италия) // Физика Земли. 2019. № 3. С. 1–10.
11. *Миллюков В.К., Аморузо А., Кресчетини Л., Мионов А.П., Мясников А.В., Лагуткина А.В.* Оценка параметров резонанса жидкого ядра Земли на основе многолетних наблюдений деформаций литосферы в суточном приливном диапазоне // Физика Земли. 2018. № 2. С. 151–163.
12. *Молоденский М.С., Молоденский С.М.* Сравнение временных изменений приливного отклика среды в сейсмически активных и неактивных регионах // Физика Земли. 2015. № 1. С. 63–72.
13. *Молоденский С.М.* Влияние рельефа плоской области на приливные наклоны и деформации: эффекты второго порядка // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986. № 8. С. 3–14.
14. *Мясников А.В.* О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере Баксанского большебазового лазерного интерферометра // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 2. С. 27–38.
15. *Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В. и др.* Геодинамика, сеймотектоника и вулканизм Северного Кавказа / Под ред. акад. Лаверова Н.П. М.: Изд-во ИФЗ РАН 2001. 333 с.
16. *Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х.* Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44. С. 19–40.
17. *Спирidonov Е.А., Виноградова О.Ю.* Атмосферные нагрузочные деформации // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 2. С. 15–22.
18. *Beaumont C., Berger J.* Earthquake Prediction: Modification of the Earth Tide Tilts and Strains by Dilatancy // Geophys. J.R. Astron. Soc. 1974. V. 39. P. 111–121.
19. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // Phys. Earth Plan. Int. 1981. V. 25. P. 297–356.
20. *Wenzel H.G.* The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package ETERNA 3.30 // Bull. Inf., Marées Terrestres. 1996. No 124. P. 9425–9439.

**REGIONAL TIDAL RESPONSE OF THE GEOPHYSICAL MEDIUM****A. V. Myasnikov<sup>a,#</sup>, Corresponding Member of the RAS L. E. Sobisevich<sup>b</sup>, and D. V. Likhodeev<sup>b</sup>**<sup>a</sup>*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*<sup>#</sup>*E-mail: andrey0405@mail.ru*

The results of long-term experimental observations of tidal deformations of the Earth's crust, obtained by means of the unique laser interferometer of the Moscow State University GAISH in the deep underground tunnel of the Baksan Neutrino Observatory, are presented. A fifteen-year data series of continuous observations of lithospheric deformations and the corresponding theoretical tide values with the specific attention paid to the main lunar wave M2 are analyzed. On the basis of the data obtained, the certain features in the response of a given volume of a layered geophysical medium to tidal influence were studied featuring certain changes in its amplitude and phase parameters with respect to the regularities of the seismic process. The possibilities of utilization of the mentioned parameters of the tidal response of the geophysical medium as some possible indicators of the formation and development of focal structures of regional seismic events are considered.

*Keywords:* lunar and solar tide, amplitude and phase parameters, stress-strain conditions, regional seismicity