

УДК 550.34.013.2

МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ ИНТЕРСЕЙСМИЧЕСКОГО НАКОПЛЕНИЯ И КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ НАПРЯЖЕНИЙ СРЕДЫ ВБЛИЗИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА АНАЛИЗЕ ПРИЛИВНОГО ОТКЛИКА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

© 2020 г. М. С. Молоденский^{1,*}, М. С. Молоденская¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: molodenskiy@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2018 г.

После доработки 14.03.2019 г.

Принята к публикации 24.06.2019 г.

Существующая сеть сейсмических станций Global Seismographic Network (GSN), включающая в себя более 150 расположенных по всему миру сейсмостанций, позволяет регистрировать не только высокочастотные сейсмические сигналы, но и отклик среды на приливное воздействие с полусуточными и суточными периодами. Разработанный нами корреляционный метод анализа данных сети GSN позволяет определять изменения амплитуд приливного отклика, связанные с величинами упругих модулей среды, с точностью до 0.5%. Процессы накопления напряжений и трещинообразования в области тектонического разлома могут существенно повлиять на упругие свойства среды, что, в свою очередь, может вызвать изменения в приливном отклике среды вблизи очага землетрясения. В данной работе обнаружена линейная зависимость между изменением амплитуды приливного отклика на станциях GSN, и полученной с помощью GPS-данных величиной косейсмического изменения напряжений среды в окрестности станции. Разработанный метод анализа данных о приливных наклонах может быть использован для изучения процессов накопления и перераспределения тектонических напряжений, предшествующих сильным землетрясениям в сейсмически активных регионах.

Ключевые слова: отклик среды, приливное воздействие, величина косейсмического изменения.

DOI: 10.31857/S0002333720030060

ВВЕДЕНИЕ

Приливные деформации в каждой точке Земли являются периодической функцией времени при постоянных значениях упругих модулей и плотности среды. Метод непрерывного мониторинга механических свойств среды в окрестностях очагов землетрясений, основанный на анализе ее отклика на лунно-солнечные приливы, был предложен Е. Нишимурой [Nishimura, 1950]. Идея метода основана на предположении о том, что процессы накопления напряжений и трещинообразования в области тектонического разлома могут существенно повлиять на упругие свойства среды, что, в свою очередь, может вызвать изменения в приливном отклике среды вблизи очага землетрясения. Изменение упругих модулей связано с нелинейной зависимостью напряжений среды от деформации. Возможность применения метода мониторинга исследовались в работах [Mikumo, 1978; Kato, 1979; Mao, 1989], однако ни одна из этих работ не подтвердила возможность использования данного метода для прогноза зем-

летрясений в связи с отсутствием достаточно длительных рядов наблюдений приливных амплитуд. Численное моделирование изменений приливного отклика при малом изменении модулей упругости впервые производилось методом конечных элементов в работах [Beamont, 1974; Tanaka, 1976]. В этих работах модули варьировались в области, имеющей различные размеры и различную геометрическую форму. Для простейших моделей изотропной среды и выбранных параметров области неоднородности было показано, что относительное изменение амплитуд приливного отклика в очаговой области может иметь тот же порядок, что и относительное изменение модулей упругости. Аналитические решения задачи о приливных наклонах среды с неоднородным включением [Молоденский, 1977; Молоденский С.М., Крамер, 1980] подтверждают результаты, полученные с помощью прямых численных методов.

Анализ данных о зарегистрированных в непосредственной близости к эпицентру приливных наклонах до и после землетрясения 11.03.2011 г.

($M_w = 9.1$) в Японии дает уникальную возможность проверить предположение о возможности прогноза землетрясений с помощью метода непрерывного мониторинга приливных наклонов среды. Сейсмические станции, расположенные вблизи эпицентра землетрясения Тохоку, регистрируют не только высокочастотные сигналы с периодами, близкими к секундам и минутам, но также и низкочастотные приливные волны, имеющие полусуточные и суточные периоды. Анализируя приливные амплитуды до и после землетрясения, можно обнаружить эффекты, предшествующие землетрясению, и в дальнейшем использовать данный эффект в качестве прогностического фактора. Для более слабых землетрясений с этой же целью ранее в работах [Gladwin, 1985; Linde, 1992] использовался спектральный анализ приливных наклонов. Как было показано в этих работах, разрешающая способность спектрального анализа не превышает 3% для интервала длительностью в 60 дней. Это ограничение возникает в связи с необходимостью разделения близких по частоте лунных и солнечных приливных компонент (а также разделения лунных компонент и главных компонент термоупругих деформаций солнечно-го происхождения, имеющих те же главные частоты, что и солнечные компоненты). В работе [Linde, 1992] исследовались приливные наклоны на сейсмических станциях вблизи эпицентра землетрясения Лома-Приета 1992 г. ($M_w = 7$). В связи с низкой точностью используемого метода и относительно низкой магнитудой землетрясения никаких предвестников обнаружено не было. Связь приливного отклика среды и сейсмичности также исследовалась по деформационным данным в Приэльбрусье [Милоков, 2015]. Наблюдения за лунной компонентой M_2 выявили связь временных вариаций амплитуд приливных деформаций с региональной сейсмической активностью.

В работе [Ito, 2009] приливное смещение поверхности Земли в суточном и полусуточном диапазоне частот наблюдалось в течение нескольких месяцев с помощью сети GPS-станций в Японии (рис. 1). Амплитуды смещений оказались в хорошем соответствии с результатами моделирования [Fu, 2007]. Временные изменения амплитуд приливных приливных наклонов обнаружить не удалось из-за того, что длительность обработанных временных рядов не превышала нескольких месяцев [Ito, 2009]. Сеть GPS-станций Японии гораздо более плотная по сравнению с сейсмическими станциями GSN, однако датчики расположены на поверхности Земли, из-за чего сигнал в приливном диапазоне частот оказывается сильно зашумлен из-за изменения количества осадков, атмосферного давления и термоупругих деформаций среды.

Предложенный в работе [Молоденский, 2012] новый метод корреляционного анализа спектральных компонент приливного отклика позволил впервые зарегистрировать изменения упругих модулей среды в очаговой зоне на сейсмической станции Тоноямасаки (TYS) по записям приливных наклонов земной поверхности в северном направлении (канал LHN) за шесть лет до и четыре года после японского землетрясения Тохоку [Молоденский М.С., 2015]. Анализ данных обнаружил значительный рост лунной приливной компоненты M_2 в течение двух лет до землетрясения, связанный с изменением модулей упругости среды в результате накопления тектонических напряжений. За ростом амплитуд лунных компонент последовал резкий спад в результате высвобождения тектонических напряжений после землетрясения. В течение четырех лет после землетрясения приливные амплитуды оставались примерно неизменными (по данным о суммарном приливном отклике всех лунных компонент в направлении север—юг) или медленно росли (по данным о приливном отклике главной лунной компоненты M_2 в том же азимуте), но все время оставались на уровне, значительно меньшем их среднего уровня за два года перед землетрясением. Разработанный нами метод анализа данных о приливном отклике поверхности Земли позволяет детектировать изменения приливных амплитуд со среднеквадратической погрешностью 0.5%, что в 6 раз меньше погрешности стандартного метода скользящего анализа для того же интервала в 30 дней [Molodenskiy M.S., 2015].

Длительность исследованных ранее временных рядов приливного отклика поверхности Земли вблизи очага землетрясений не превышала двух лет, а количество сейсмических станций не превышало двух [Gladwin, 1985; Linde, 1992]. Основными проблемами при исследовании амплитуд приливного отклика среды в непосредственной близости от эпицентра землетрясения были отсутствие длительных временных рядов наблюдений, обработка больших объемов данных, применение недостаточно чувствительного метода спектрального анализа сигнала и сравнительно низкая магнитуда исследованных землетрясений в Калифорнии. Кроме того, в работах по данной тематике не проводились исследования возмущений низкочастотного приливного сигнала внешними факторами и оценка достоверности результатов обработки данных.

Запуск в 2003–2005 гг. японской сети сейсмических станций *F-net* позволил впервые изучить процесс накопления напряжения среды в непосредственной близости от очага землетрясения Тохоку 2011 г. за шесть лет до сейсмического события и в течение четырех лет после катастрофического землетрясения. В данной работе произведе-

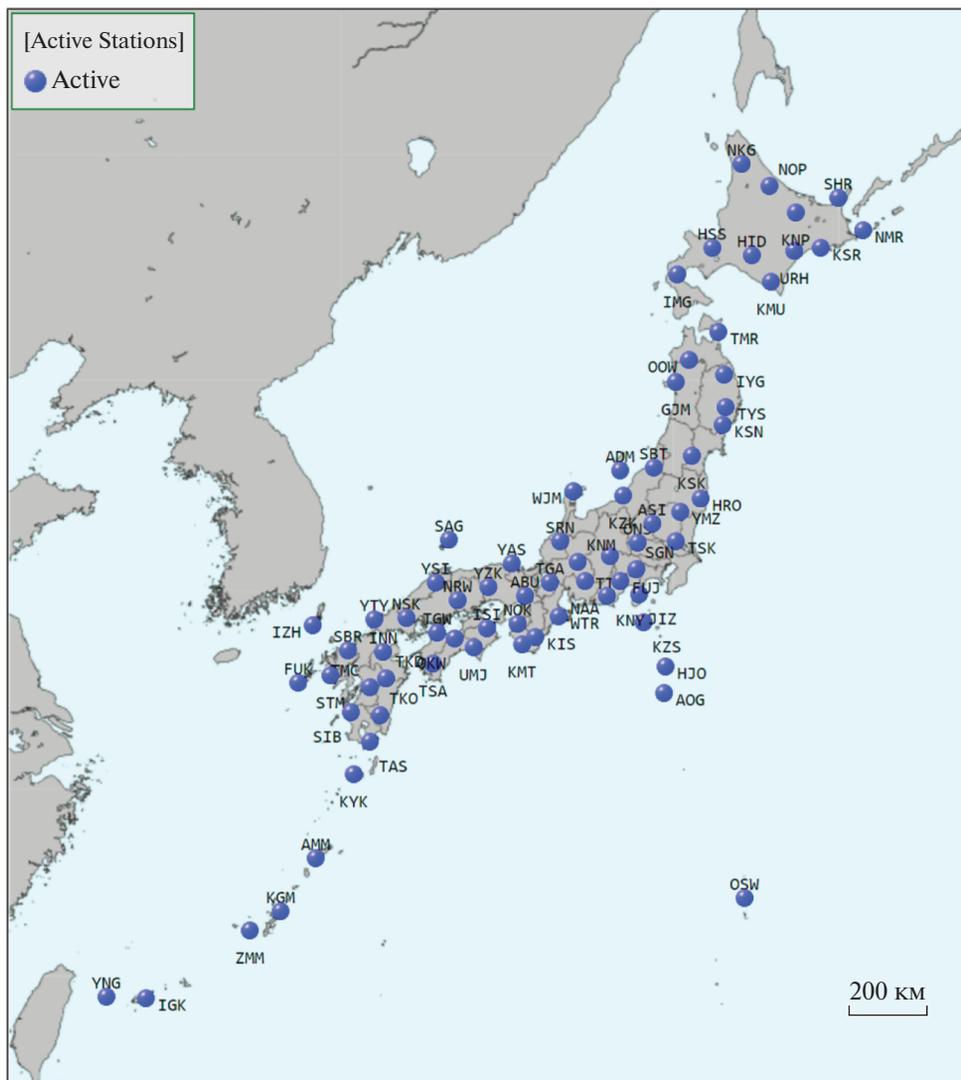


Рис. 1. Карта сейсмических станций сети F-net в Японии.

ден анализ данных с пяти сейсмических станций, расположенных в регионе Тохоку на расстоянии 100–200 км от очага землетрясения. Обнаружена линейная зависимость между изменением амплитуды приливного отклика на пяти станциях GSN и величиной косейсмических деформаций среды в окрестности станции, полученной с помощью GPS-данных. Разработанный нами метод анализа данных о приливных наклонах может быть использован для изучения процессов накопления и перераспределения тектонических напряжений, предшествующих сильным землетрясениям в сейсмически активных регионах.

Обработка GSN-данных

Данные о приливных наклонах с шагом по времени, равным одной секунде, были собраны в непрерывные временные ряды с 2005 по 2015 гг.,

после чего было произведено усреднение сигнала до часа. Приливный сигнал за весь исследуемый промежуток времени можно представить в виде синтетического временного ряда, представляющего из себя сумму восьми главных суточных и полусуточных приливных компонент с амплитудами, определяемыми вычислением соответствующего интеграла Фурье за весь исследуемый промежуток времени. Отсчеты наклономерных датчиков, превышающие максимальные приливные амплитуды на порядок, обнулялись для построения корректного синтетического приливного сигнала. Суммарная длительность обнуленных таким образом отрезков времени составила десятки часов, или 0.1% от общей длительности сигнала на каждой из пяти сейсмических станций.

Пробелы в данных о приливных наклонах, связанные с техническим обслуживанием оборуду-

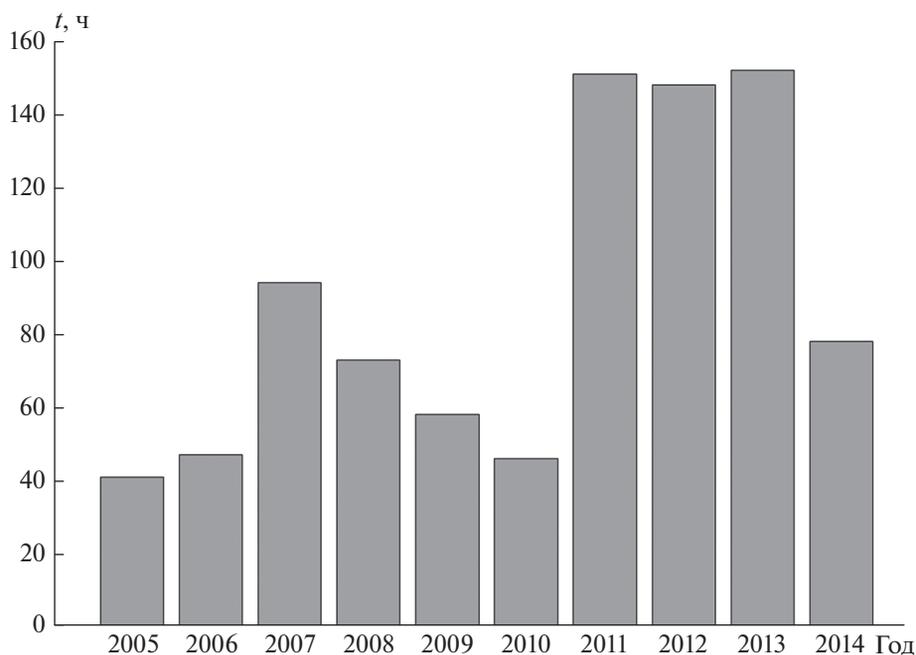


Рис. 2. Распределение отфильтрованных данных в часах за год с 2005 по 2014 гг. по данным с сейсмической станции TYS, канал LHN.

дования несколько раз в год и, как правило, не превышающие сутки, заменялись синтетическим приливным сигналом — двойным преобразованием Фурье. При отклонении усредненного до часа приливного сигнала от синтетического более чем на одну амплитуду приливных наклонов, значения приливных наклонов также заменялись двойным преобразованием Фурье за весь временной интервал. Общая длительность отфильтрованных таким образом данных для каждой станции составила несколько сотен часов, но не более одного процента от общей длительности каждого временного ряда. На рис. 2 представлено распределение суммарной длительности отфильтрованных данных в часах за год с 2005 по 2015 гг.

Высокочастотные сейсмические импульсы могут оказывать возмущение на низкочастотную приливную составляющую преимущественно после сейсмического события. Поэтому все высокочастотные афтершоковые возмущения были отфильтрованы при обработке данных о приливных наклонах. Приливный сигнал, зарегистрированный в течение 2010 г., не нуждался в значительной фильтрации, так как высокочастотные форшоки не влияли на запись приливного сигнала при усреднении до часа благодаря высокой линейности наклономерного датчика. Таким образом, форшоки не оказывали влияние на данные о приливных наклонах и не могли быть причиной ошибочной регистрации изменения приливных амплитуд за два года перед землетрясением Тохоку на станции TYS [Молоденский М.С. и др., 2016].

Анализ данных показал, что фильтрация приливного сигнала после сейсмического события также не оказывает сильного влияния на характер временной зависимости амплитуды приливных наклонов, однако распределение, представленное на рис. 2, может быть полезным при оценке возмущения низкочастотного приливного сигнала внешними факторами. Отношение суммарной длительности отфильтрованных временных интервалов к общей длительности сигнала использовалось в качестве параметра, определяющего степень достоверности данных об изменении амплитуды приливных наклонов. Анализ данных с восьми сейсмических станций региона Тохоку показал, что приливный сигнал имеет большую достоверность на станциях, углубленных в гранитной породе. Наибольшей фильтрации подверглись данные с сейсмических станций, расположенных внутри пористых осадочных пород с низкой плотностью. На упругие свойства такой среды может сильно влиять количество осадков, а уровень воды в водоемах, расположенных в непосредственной близости от такой сейсмической станции, может оказывать возмущение на приливный сигнал. Часто один из двух каналов, регистрирующих наклоны на север—юг и запад—восток, был зашумлен в приливном диапазоне частот на порядок больше другого, что может быть связано с локальными неоднородностями среды и влиянием водоемов.

На рис. 3 изображен приливный спектр наклонов сейсмического датчика станции TYS в полу-суточном диапазоне частот.

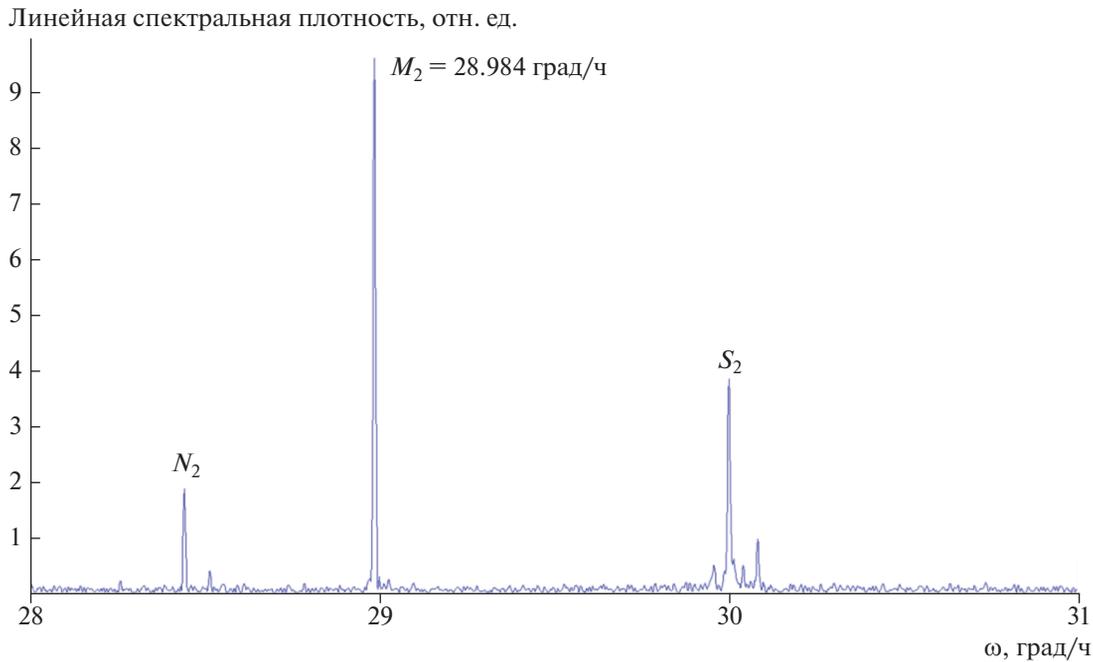


Рис. 3. Приливный спектр наклономерного сейсмического датчика на станции TYS, канал LHN в полусуточном диапазоне частот.

Для построения спектра использовался десятилетний ряд наблюдений приливных наклонов в северном направлении на станции Тоноямаки. Из рис. 3 видно, что отношение приливного сигнала к шуму составляет 10^2 , а характерная ширина лунных и солнечных пиков в приливном спектре значительно меньше расстояния между ними, что исключает взаимное наложение главных солнечных и лунных компонент приливного спектра.

Результаты численного моделирования подтверждают, что стандартный метод спектрального анализа не позволяет увидеть малое изменение амплитуд приливных наклонов, успешно детектируемый методом корреляционного анализа [Молоденский С.М., 2016]. Разработанный в этой работе метод корреляционного анализа синтетических рядов позволяет в несколько раз увеличить чувствительность и временное разрешение стандартных методов скользящего спектрального анализа. Основной причиной низкой точности метода спектрального анализа при изучении временных изменений амплитуды приливного отклика является значительное увеличение ширины спектральных пиков при обработке временного ряда длительностью в несколько месяцев. Увеличение ширины приводит к частичному перекрытию лунных и солнечных пиков приливного спектра, в результате чего солнечные компоненты прилива оказывают влияние на амплитуду лунных компонент. Разделение лунных и солнечных приливных компонент на коротких временных интервалах является важной задачей при анализе

приливного спектра в связи с сильным возмущением солнечных компонент термоупругими деформациями поверхности Земли, техногенными факторами и изменением атмосферного давления.

Метод корреляционного анализа приливного сигнала

Для анализа временных изменений амплитуды прилива необходимо разделить весь имеющийся временной ряд данных (в нашем случае, общая длительность сигнала равна десяти годам) на равные временные интервалы длительностью в несколько месяцев. Представим приливный сигнал на каждом из временных интервалов в виде суммы доминирующей лунной компоненты M_2 и семи других солнечных и лунных главных приливных компонент:

$$T_i = c_{M_2} M_2 + c_s \left(\sum_{i=1}^3 m_i + \sum_{i=1}^4 s_i \right),$$

где: m_i, s_i — главные лунные и солнечные компоненты, соответственно; а c_{M_2} и c_s — искомые зависящие от времени коэффициенты, подлежащие определению. В дальнейших исследованиях наибольший интерес представляет временное изменение амплитуды доминирующей лунной компоненты M_2 в связи с минимальным воздействием на нее суточных техногенных факторов и солнечных термоупругих деформаций поверхности Земли

[Молоденский М.С. и др., 2016]. Определяя эти коэффициенты методом наименьших квадратов, т.е. приравнивая к нулю производные по c_{M_2} и по c_s от суммы по анализируемому временному ряду, длительностью в несколько месяцев:

$$\sum \left(T_0 - c_{M_2} M_2 - c_s \left(\sum_{i=1}^3 m_i + \sum_{i=1}^4 s_i \right) \right), \quad (1)$$

где T_0 – отфильтрованный временной ряд наблюдений приливных наклонов наклономерного датчика, получим систему двух линейных алгебраических уравнений для c_{M_2} и c_s :

$$\begin{aligned} \sum \left(M_2 \left(T_0 - c_{M_2} M_2 - c_s \left(\sum_{i=1}^3 m_i + \sum_{i=1}^4 s_i \right) \right) \right) &= 0; \\ \sum \left(\left(\sum_{i=1}^3 m_i + \sum_{i=1}^4 s_i \right) \times \right. & \\ \left. \times \left(T_0 - c_{M_2} M_2 - c_s \left(\sum_{i=1}^3 m_i + \sum_{i=1}^4 s_i \right) \right) \right) &= 0. \end{aligned}$$

Интересующая нас информация содержится в зависимости от времени коэффициента c_{M_2} , определяющего отклонение лунной компоненты M_2 от соответствующей компоненты синтетического приливного сигнала. Преимущество предложенного нами метода анализа приливных наклономерных данных состоит в том, что угловая частота волны M_2 сравнительно далеко отстоит от частот всех солнечных компонент и частот термоупругих деформаций, поэтому эта волна с меньшей погрешностью может быть отделена от менее помехоустойчивых компонент.

Данный метод анализа приливного сигнала отличается более высокой чувствительностью к изменению амплитуд на временных интервалах длительностью в несколько месяцев. Метод спектрального анализа, который используется в пакетах ETERNA [Wenzel, 1996] и VAV [Venedikov, 2003], не способен зарегистрировать 1% изменения лунных компонент синтетического приливного сигнала в том случае, если солнечные компоненты зашумлены на 10% от максимальной амплитуды. Высокая зашумленность солнечных компонент приливного сигнала за счет термоупругих деформаций среды и техногенных факторов не позволяет определять столь малые изменения лунных компонент на интервалах времени в несколько месяцев с помощью метода спектрального анализа из-за частичного перекрытия лунных и солнечных пиков в спектре. Метод корреляционного анализа позволяет детектировать данные изменения с высокой степенью достоверности [Molodenskiy M.S., 2015].

Карта косейсмической деформации среды в окрестности эпицентра землетрясения Тохоку, полученная с использованием GPS-данных

Плотная сеть GPS-станций в Японии позволяет использовать данные о косейсмическом смещении земной поверхности для построения карт деформаций и изменения тектонических напряжений среды. Большое количество исследований говорит о значительном перераспределении напряжений в масштабах всего острова после 11.03.2011 г. [Grapentin, 2011]. Максимальную величину косейсмического изменения сдвиговых деформаций в треугольной области на карте рельефа, в вершинах которой расположены станции GPS, можно оценить как [Terada, 1929; Tsuboi, 1933]:

$$\left(e_{xy}^2 + (e_{xx} - e_{yy})^2 / 4 \right)^{0.5},$$

где e – приращение вектора смещения для треугольной области, полученное из данных GPS о смещении вершин треугольника. На рис. 4 представлена карта максимальных сдвиговых деформаций после землетрясения Тохоку.

В вершинах треугольных областей расположены станции GPS, черными кругами отмечены сейсмические станции сети F -net, регистрирующие приливные наклоны. Из рис. 4 можно сделать вывод, что максимальные сдвиговые деформации произошли в южной части региона Ивате и северной части региона Мияги, достигая значений 45×10^{-6} . Оценки распределения косейсмических деформаций и напряжений среды в регионе Тохоку с использованием GPS-данных были выполнены в работах [Toda, 2011; Takahashi, 2011]. Согласно численной модели приливных деформаций поверхности Земли [Молоденский Д.С., Молоденский М.С., 2012] на станциях KSN, TYS, KSK и HRO должны наблюдаться изменения амплитуд приливных наклонов земной поверхности, величина которых на порядок превышает максимальную разрешающую способность используемого метода анализа временных рядов.

Изменение амплитуды приливных наклонов на сейсмических станциях GSN в окрестности эпицентра землетрясения Тохоку

Для изучения временной зависимости амплитуды приливного отклика были обработаны данные с пяти ближайших к эпицентру датчиков сейсмических станций HRO, IYG, KSK, KSN и TYS, регистрирующих наклоны в северном (канал LHN) и восточном (канал LHE) направлении. После фильтрации временные ряды были проанализированы методом корреляционного анализа для получения временной зависимости амплитуды лунной компоненты M_2 на временном интервале

с 2005 по 2015 гг. Выбор между каналом LHN и LHE делался в пользу наименее зашумленного канала с минимальным количеством отфильтрованных данных. Так, например, для станции HRO общая длительность отфильтрованных данных составляла 568 ч для канала LHE и 3843 ч для канала LHN. Такие большие различия в возмущениях, оказываемых на приливные наклоны в северном и восточных направлениях, могут объясняться наличием в окрестностях сейсмической станции водоемов с переменным уровнем воды, геологической структурой среды в окрестности шахты сейсмической станции, а также воздействием морских приливов на наклоны поверхности Земли.

На рис. 5а изображена временная зависимость относительного изменения амплитуды приливной компоненты M_2 в восточном направлении станции HRO, расположенной на расстоянии 160 км от эпицентра землетрясения Тохоку 2011 г. Суммарная длительность отфильтрованных и недоступных в связи с техническим обслуживанием интервалов времени составила 568 ч, или 0.7% от общей длительности наблюдений с 2005 по 2015 гг.

Согласно карте, полученной на основании данных GPS (рис. 4), в области станции HRO произошло значительное изменение сдвиговых деформаций, которое можно оценить величиной 14×10^{-6} . На рис. 5 наблюдается уменьшение приливной амплитуды после 11.03.2001 г. на 9%, что может быть связано с косейсмической разгрузкой тектонических напряжений. В начале 2006 г. на станции HRO произошло увеличение амплитуды приливных наклонов на 1%, после чего наблюдался временный спад амплитуды лунной компоненты до начала 2009 г., а в 2009 и 2010 гг. зарегистрирован рост амплитуды приливных наклонов на 3%. Полученные результаты можно интерпретировать как рост тектонических напряжений в регионе Тохоку в начале 2006 г., временную разгрузку напряжений на протяжении следующих двух лет, и сравнительно быстрый рост напряжений среды в течение двух лет перед катастрофическим землетрясением 2011 г.

На рис. 5б представлена временная зависимость относительного изменения амплитуды приливной компоненты в северном направлении станции IYG, расположенной на расстоянии 200 км от эпицентра землетрясения Тохоку 2011 г. Суммарная длительность отфильтрованных интервалов времени составила 304 ч, или 0.4% от общей длительности наблюдений с 2005 по 2015 гг. С 01.01. по 25.04.2011 г. регистрация данных была прервана из-за перебоев питания. С 2005 по 2011 гг. наблюдается рост амплитуды приливных наклонов на 3%. После землетрясения Тохоку произошло уменьшение амплитуды лунной компоненты c_{M_2} более чем на 3%.

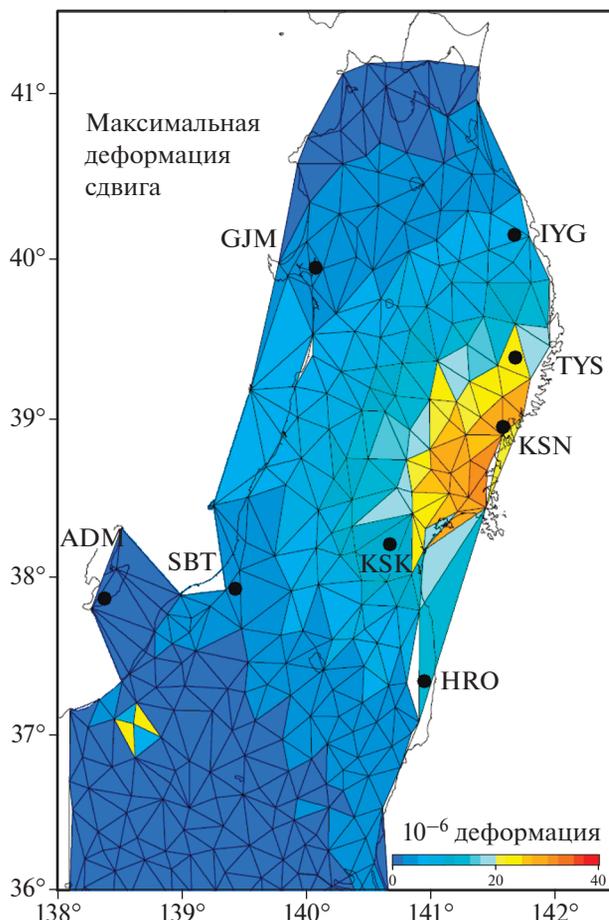


Рис. 4. Карта максимальных сдвиговых деформаций после землетрясения Тохоку, станции IYG – Yamagata; GJM – Gojome; TYS – Tonoyamasaki; KSN – Kesenuma; KSK – Kawasaki; SBT – Shibata; ADM – Akadomari; HRO – Hirono.

Данные о приливном отклике среды, зарегистрированные на станции KSK, сильно зашумлены в низкочастотном диапазоне. Общая длительность отфильтрованных временных интервалов канала LHN составила 4722 ч, или 5% от общей длительности временного ряда на графике наблюдается рост с начала 2005 до апреля 2011 гг., сменившийся убыванием после землетрясения Тохоку (рис. 5в). Одной из причин сильного отклонения приливного сигнала от теоретического может быть расположение станции KSK, находящейся на глубине 47 м в туфовой породе. В отличие от гранитной среды, в которой преимущественно устанавливаются сейсмические датчики, пористая среда может сильно менять упругие свойства в зависимости от объемов сезонных осадков и грунтовых вод.

Анализ GPS-данных (рис. 4) позволяет выделить две сейсмические станции, находящиеся в области максимальных значений косейсмических вариаций напряжений среды в результате

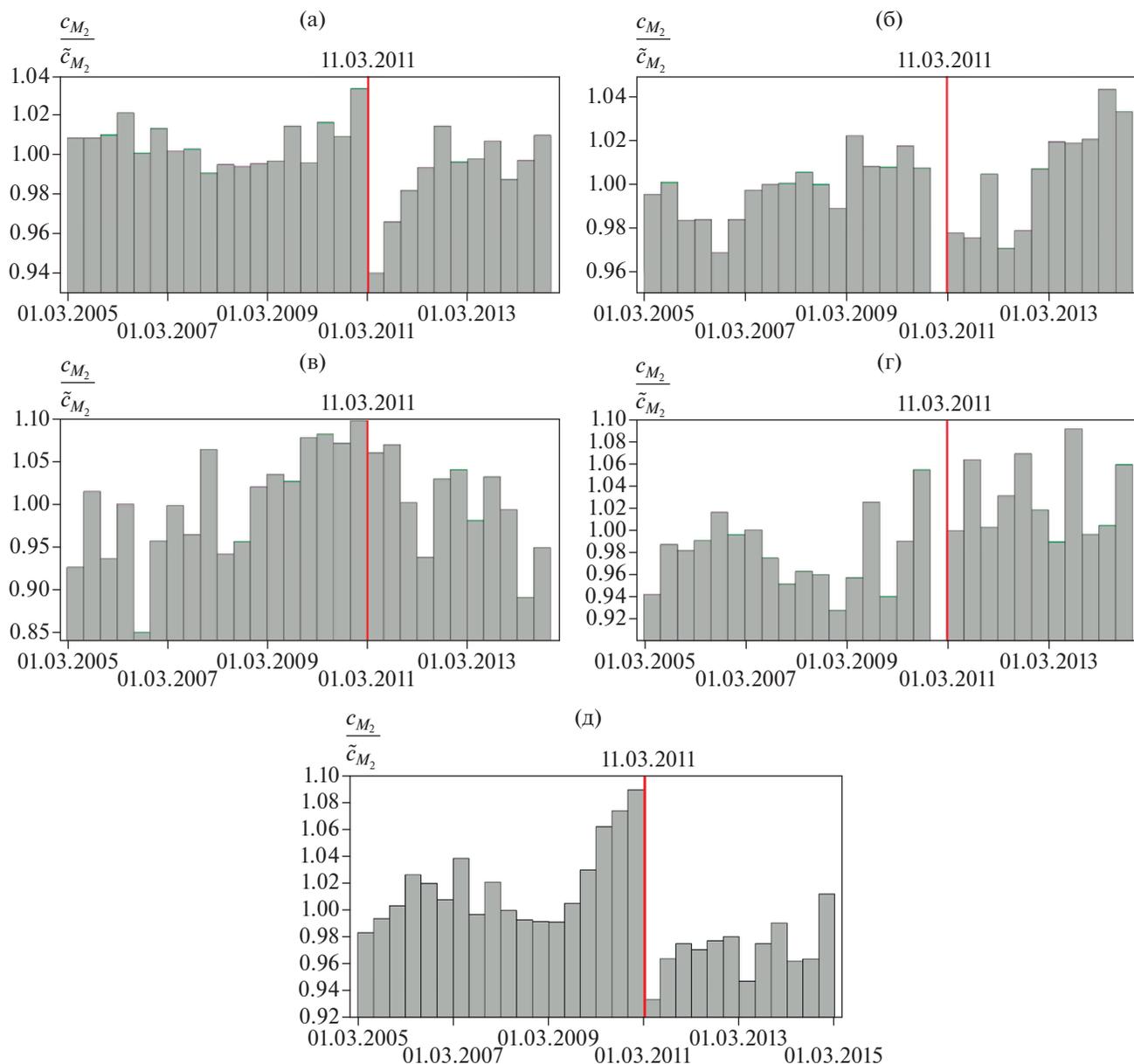


Рис. 5. Изменения во времени отношения амплитуды лунной компоненты c_{M_2} к ее среднему значению за десять лет на станциях HRO (а), IYG (б), KSK (в), KSN (г), TYS (д) с шагом 1/3 года (2922 ч). Вертикальной красной чертой отмечен момент землетрясения 11.03.2011 г.

землетрясения Тохоку — это станции KSN и TYS. Приливный сигнал со станции KSN оказался также сильно возмущен внешними факторами в приливном диапазоне частот. Общая длительность отфильтрованных временных интервалов канала LHN в приливном диапазоне частот составила 2426 ч, или 3% от общей длительности, а канала LHE—1313 ч, или 1.5%. Достоверность данных о приливных наклонах канала LHN оказалась недостаточной, а канал LHE был сильно возмущенными внешними факторами в приливном диапазоне частот после начала 2009 г. (рис. 5г).

Высокий уровень шумов в низкочастотном диапазоне частот после 2009 г. и длительный перерыв в работе датчика с 15.02.2011 по 03.03.2011 гг. в связи с отключением питания не позволяют произвести анализ временной зависимости амплитуд приливных наклонов на станции KSN непосредственно до и после землетрясения Тохоку. Однако на временном интервале с 2005 по 2009 гг. можно наблюдать рост амплитуды приливных наклонов с максимумом в середине 2006 г. и последующим убыванием до прежних значений к началу 2011 гг.

Аналогичную картину роста до начала 2006 г. и последующего убывания до прежних значений

Таблица 1. Косейсмическая сдвиговая деформация среды в окрестности станции и зарегистрированное изменение амплитуды приливных наклонов

| GSN station | IYG | GJM | TYS | KSN | KSK | SBT | ADM | HRO |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----|---------------------|
| Относительное изменение амплитуды приливной компоненты M_2 после землетрясения | 0.03 | 0.02 | 0.15 | Нет данных в связи с обслуживанием оборудования | Нет данных в связи с зашумлением | 0.04 | 0 | 0.09 |
| Максимальное косейсмическое изменение деформации сдвига | 6×10^{-6} | 4×10^{-6} | 22×10^{-6} | 26×10^{-6} | 14×10^{-6} | 5×10^{-6} | 0 | 14×10^{-6} |

амплитуды приливных наклонов можно наблюдать при анализе изменений приливных наклонов станции *TYS* на временном интервале с 2005 по 2009 г., (канал *LHN*, рис. 5д). Сейсмометры станции Тоноямасаки находятся на глубине 50 м в гранитном массиве, при этом станция достаточно удалена от крупных городов, водоемов, и береговой линии, в связи с чем на станции следует ожидать низкий уровень возмущений приливного сигнала. Сравнение рис. 5а, 5г и 5д позволяет предположить, что в течение 2005 г. в окрестности эпицентра землетрясения Тохоку имело место накопление тектонических напряжений. Однако напряжения среды не достигли критических значений, и в течение 2007 и 2006 гг. произошла частичная разгрузка напряжений в результате локальных сейсмических событий с низкой магнитудой и в связи с эффектами реологии среды [Молоденский М.С., 2014; Молоденский М.С. и др., 2016].

Как видно из рис. 2, суммарная длительность отфильтрованных временных интервалов для канала *LHN* станции *TYS* составила лишь 888 ч, или 1% от общей длительности сигнала. Сравнительно низкий уровень возмущений приливного сигнала в временном промежутке с 2009 по 2011 гг. позволяет наблюдать процесс значительного роста амплитуды приливных наклонов, связанный с накоплением напряжений среды на расстоянии 120 км от эпицентра землетрясения Тохоку 2011 г. Результатом двухлетнего роста напряжений среды стало увеличение амплитуды лунной компоненты c_{M_2} на 10% и последующее скачкообразное уменьшение на 15% после косейсмической разгрузки тектонических напряжений. Согласно результатам анализа GPS-данных величина косейсмических сдвиговых деформаций в этой области составляла более 20×10^{-6} .

Сравнение результатов обработки GPS- и GSN-данных

Для определения временной зависимости изменения упругих модулей, а также напряжений

среды непосредственно на самом разломе землетрясения Тохоку, необходимо численно решить задачу, обратную задаче о влиянии неоднородного включения на приливные наклоны. Данные о приливных наклонах в окрестности эпицентра землетрясения Тохоку за десять лет не позволяют найти однозначное решение обратной задачи в связи с недостаточным количеством сейсмических станций и сильным возмущением низкочастотного приливного сигнала с нескольких GSN-станций внешними факторами. Для изучения корреляции между значением косейсмической сдвиговой деформации среды в окрестности станции и соответствующим изменением амплитуды приливных наклонов было проведено сравнение этих величин для восьми сейсмических станций региона Тохоку (табл. 1).

На рис. 6 представлена зависимость величины косейсмического изменения сдвиговых деформаций в окрестности станции GSN от относительного изменения амплитуды лунной компоненты после землетрясения Тохоку для шести сейсмических станций *IYG*, *GJM*, *TYS*, *SBT*, *ADM* и *HRO*. Рисунок демонстрирует связь между двумя величинами, непосредственно измеренными с помощью GPS-станций и сейсмическими станциями GSN. Зависимость аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом 1.5×10^{-4} . В линейном приближении максимальная деформация сдвига, характеризуемая относительным сдвигом γ , зависит от относительного изменения амплитуды компонент приливных наклонов после землетрясения как:

$$\gamma = 1.5 \times 10^{-4} \Delta \frac{c_{M_2}}{\tilde{c}_{M_2}}$$

Линейное приближение зависимости максимальных значений деформаций и напряжений от изменения приливных амплитуд основано на результатах численного моделирования [Молоденский Д.С., Молоденский М.С., 2012]. Построение карт максимальных значений деформации

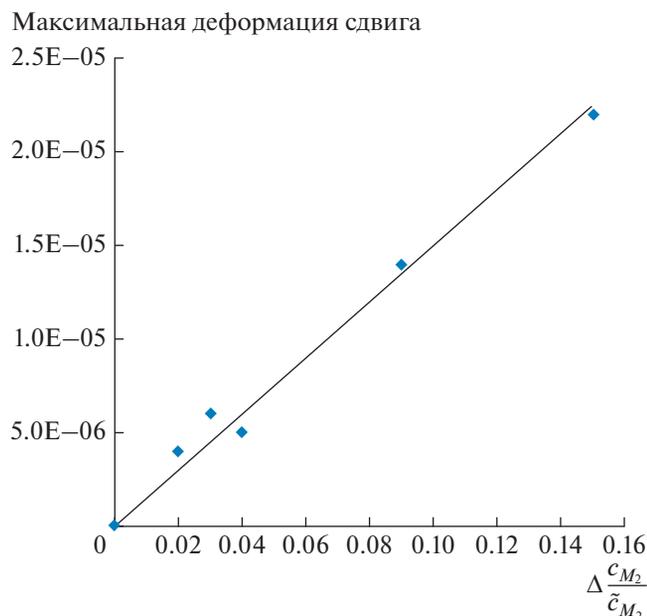


Рис. 6. Зависимость величины косейсмических сдвиговых деформаций от относительного изменения амплитуды лунной компоненты $\Delta \frac{c_{M_2}}{\bar{c}_{M_2}}$ после землетрясения Тохоку для пяти сейсмических станций.

растяжения и сжатия, полученных с использованием GPS-данных, и сравнение с изменением приливных амплитуд позволило определить значения соответствующих коэффициентов -0.8×10^{-4} и 0.3×10^{-4} . Более точное решение задачи, описанной в работе [Молоденский М.С., 2012], может позволить изучить процесс перераспределения и роста напряжений непосредственно в области тектонического разлома, однако для этого требуется более плотная сеть сейсмических станций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проанализирована временная зависимость амплитуд приливных наклонов на восьми сейсмических станциях в радиусе двухсот километров от эпицентра землетрясения с магнитудой $M_w = 9.1$ за шесть лет до и в течение четырех лет после сейсмического события. Сравнение величин косейсмического изменения амплитуд приливных наклонов с картой максимальных величин изменения напряжений, полученной с использованием GPS-данных, впервые выявило линейную зависимость изменения относительной приливной амплитуды от вариации деформаций в окрестности разлома с соответствующими коэффициентами. Линейная зависимость, полученная экспериментально, согласуется с результатами численного моделирования.

Полученные результаты могут быть использованы для построения динамической карты распределения тектонических напряжений вблизи разлома на интервалах времени длительностью в шесть лет до, и в течение четырех лет после землетрясения Тохоку. Для использования результатов в качестве одного из прогностических признаков, необходимо наличие более плотной сети сейсмических станций с минимальными возмущениями сигнала в приливном диапазоне частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Милуков В.К., Мясников А.В., Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г. Исследование взаимосвязи приливного отклика среды и сейсмичности по деформационным данным в Приэльбрусье. Всероссийская научно-практическая конференция “Геодинамика Кавказа: инструментальные наблюдения и математическое моделирование”, 21–23 октября 2015 г. Владикавказ. Тезисы докладов. 2015.

Молоденский С.М. О влиянии горизонтальных неоднородностей мантии на амплитуды приливных волн // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1977. № 2.

Молоденский С.М., Крамер М.В. Влияние крупномасштабных горизонтальных неоднородностей мантии на земные приливы // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. № 1. 1980. Р. 3–20.

Молоденский М.С. Об упругих деформациях упругой неоднородной среды в очаговой зоне // Геофизические исследования 2012. Т. 13. № 3. С. 45–55.

Молоденский Д.С., Молоденский М.С. О временных изменениях приливного отклика среды в окрестностях очагов катастрофических землетрясений // Физика Земли. 2012. № 11. С. 56–58.

Молоденский М.С. Учет реологии среды при решении обратной задачи моделирования тектонического разлома по данным GPS наблюдений // Сейсмические приборы. 2014. № 4. С. 15–26.

Молоденский М.С. Временные изменения приливного отклика среды перед великим японским землетрясением по данным ближайших к очагу сейсмических станций // Физика Земли. 2015. № 3. С. 1–4.

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.

Молоденский М.С., Молоденский Д.С., Бегитова Т.А. Временные изменения напряжений в очаговой зоне японского землетрясения 11.03.2011 ($M = 9$) по данным о приливном отклике // Физика Земли. 2016. № 2. С. 1–9.

Молоденский С.М., Молоденский М.С. Бегитова Т.А. 3D-модели медленных движений земной коры и верхней мантии в очаговых зонах сейсмоактивных областей и их сравнение с данными наблюдений. 2. Результаты численных расчетов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 1–14.

Angel P. Venedikov, Jose Arnos, Ricardo Vieira. VAV: a program for tidal data processing // Computers & Geosciences. 2003. V. 29. P. 487–502.

- 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.
- Fu G., Sun W.* Effects of lateral inhomogeneity in a spherical Earth on gravity Earth tides // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. B06409.
- Gladwin M.T., Gwyther R.L., Higbie J.W., Hart R.H.G.* A medium term precursor to the Loma Prieta earthquake? // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 8. P. 1377–1308.
- Grapenthin R., Freymueller J.T.* The dynamics of a seismic wave field: Animation and analysis of kinematic GPS data recorded during the 2011 Tohoku – oki earthquake, Japan // *Geophysical Research Letters.* 2011. V. 38. L18308.
- Ito T., Okubo M., Sagiya T.* High resolution mapping of Earth tide response based on GPS data in Japan // *J. Geodynamics.* 2009. V. 48. P. 253–259.
- Kato M.* Observations of crustal movements by newly-designed horizontal pendulum and water-tube tiltmeters with electro-magnetic transducers. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute Bulletin. 1979. V. 29. P. 83–97.
- Linde A.T., Gladwin M.T., Johnston M.J.S.* The Loma Prieta Earthquake, 1989 and the Earth strain tidal amplitudes: an unsuccessful search for associated changes // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. P. 317–320.
- Mao W.J., Ebblin C., Zadro M.* Evidence for variations of mechanical properties in the Friuli seismic area // *Tectonophysics.* 1989. V. 170. № 3–4. P. 231–242.
- Mikumo T., Kato M., Doi H., Wada Y., Tanaka T., Shichi R., Yamamoto A.* Possibility of temporal variations in Earth tidal strain amplitudes associated with major earthquakes, Earthquake precursors. Processings of the US-Japan Seminar on Theoretical and Experimental Investigations of Earthquake Precursors: Tokyo. Center for Academic Publications Japan. 1978. P. 123–136.
- Molodenskiy M.S.* Time variations in tidal responses of a medium before the Great Japanese Earthquake. The 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. 2015. Прага. Публикация материалов конференции. С. 1019.
- Nishimura E.* On Earth tides // *American Geophysical Union Transactions.* 1950. V. 31. № 3. P. 357–376.
- Takahashi H.*, Static strain and stress changes in eastern Japan due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, as derived from GPS data // *Earth Planets Space.* 2011. V. 63. P. 741–744.
- Tanaka T.* Effect dilatancy on ocean load tides // *Pure and Applied Geophysics.* 1976. V. 114. P. 415–423.
- Terada T. Miyabe N.* Deformation of the earth crust in Kwan-sai districts and its relation to the orographic feature // *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo.* 1929. № 7. P. 223–239.
- Toda S., Lin J., Stein R.S.* Using the 2011 $M = 9.0$ Tohoku earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure // *Tohoku Earthquake Special Issue of Earth Planets Space.* 2011. V. 63. P. 725–730.
- Tsuboi C.* Investigation on the deformation of the earths crust found by precise geodetic means // *Japan J. Astron. and Geophys.* 1933. № 10.
- Wenzel H.-G.* The Nanogal Software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30 // *Bulletin d'Information Marées Terrestres.* 1996. P. 9425–9439.

Monitoring the Interseismic Stress Accumulation and Coseismic Stress Release Processes in the Vicinity of Earthquakes' Sources Based on the Analysis of Tidal Response of the Earth's Surface

M. S. Molodenskiy^{a,*} and M. S. Molodenskaya^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

**e-mail: molodenskiy@mail.ru*

The existing Global Seismographic Network (GSN) which includes more than 150 seismic stations located all over the world is not only suitable for recording the high-frequency seismic signals but it also records the response of the medium to the semidiurnal and diurnal tidal impacts. The correlation method developed by us for analyzing the GSN data makes it possible to determine variations in the amplitudes of tidal response associated with the elastic moduli of the medium with an accuracy of 0.5%. The stress accumulation and fracture formation processes in the zone of a tectonic fault can significantly affect the elastic properties of the medium which, in turn, may cause changes in the tidal response of the medium in the vicinity of the earthquake's source. In this work, we revealed a linear relationship between the change in the amplitude of the tidal response at GSN stations and the magnitude of the coseismic change in the stresses of the medium in the vicinity of the station estimated from the GPS data. The developed method for the analysis of tidal tilt data can be used for studying the processes of accumulation and redistribution of tectonic stresses before strong earthquakes in the active seismic regions.

Keywords: response of the medium, tidal impact, magnitude of coseismic change