ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 500, № 2, с. 168–172

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.094

УЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИЮ ЗЕМНОЙ КОРЫ

© 2021 г. Академик РАН Г. И. Долгих[1, *], С. Г. Долгих [1]

Поступило 17.05.2021 г.
После доработки 16.06.2021 г.
Принято к публикации 05.07.2021 г.

Описана методика оценки вклада вариаций атмосферного давления на деформацию верхнего слоя земной коры, использующая синхронные данные лазерного нанобарографа и лазерных деформографов. На отдельных примерах продемонстрированы выигрышные моменты применения данной методики при анализе полученных экспериментальных данных.

Ключевые слова: атмосферное давление, деформация земной коры

DOI: 10.31857/S2686739721100091

При изучении природы разномасштабных геосферных процессов большое значение имеет решение задачи по определению их первоисточника с локализацией мест возникновения и дальнейшего развития, с изучением закономерностей трансформации на неоднородностях геосфер и на границах геосфер. Кроме того, необходимо учитывать, что некоторые геосферные процессы одной из геосфер могут быть “замаскированы” геосферными процессами граничащих геосфер. Как показано в работах [1–4] при изучении процессов в одной из геосфер необходимо учитывать вклад в данные процессы соседних геосфер. Учет воздействия соседних геосфер может привести к совершенно неожиданным результатам, прямо противоречащим ранее полученным. Данное влияние может проявляться при воздействии полей одной природы на поля другой природы [5]. При изучении процессов, происходящих в земной коре, необходимо учитывать как вклад процессов Мирового океана, так и Атмосферы. Атмосферные процессы вносят существенный вклад в деформационные процессы земной коры и литосферы в целом, поэтому для изучения процессов, зарождающихся и протекающих в земной коре/литосфере, необходимо оценить атмосферный вклад в деформационные процессы земной коры/литосферы и вычесть данный вклад из полученных экспериментальных данных. В работе [6] выполнена подобная процедура, что позволило уверенно выделить отдельные сфероидальные тона собственных колебаний Земли из полученных экспериментальных данных, которые до этой процедуры были “замаскированы” атмосферными процессами. Вклад вариаций атмосферного давления в вариации деформации земной коры был оценен по следующей формуле:

$$\varepsilon = -\frac{P}{2(\lambda + \mu)}, \qquad (1)$$

где λ и μ – коэффициенты Ламе упругого полупространства (в рассматриваемом случае – земной коры), P – атмосферное давление. Зная изменение атмосферного давления, полученное при проведении эксперимента на высокочувствительном микробарографе в месте расположения инварового деформографа, по вышеуказанной формуле был оценен вклад атмосферного давления в экспериментальные данные, полученные на инваровом деформографе. В дальнейшем этот вклад был вычтен из экспериментальных данных, что позволило в данных инварового деформографа при спектральной обработке уверенно выделить ранее замаскированные отдельные сфероидальные тона собственных колебаний Земли.

Данная процедура учета вариаций атмосферного давления в деформационных процессах земной коры/литосферы не совсем корректна, так как не учитывает неоднородное строение верхнего слоя земной коры в местах расположения измерительных установок, что затрудняет работы по точному определению коэффициентов Ламе. Мы пошли по другому пути, связанному с определением вклада вариаций атмосферного давления в вариации деформаций верхнего слоя земной коры зоны расположения лазерных деформографов.

[1] *Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*
**E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

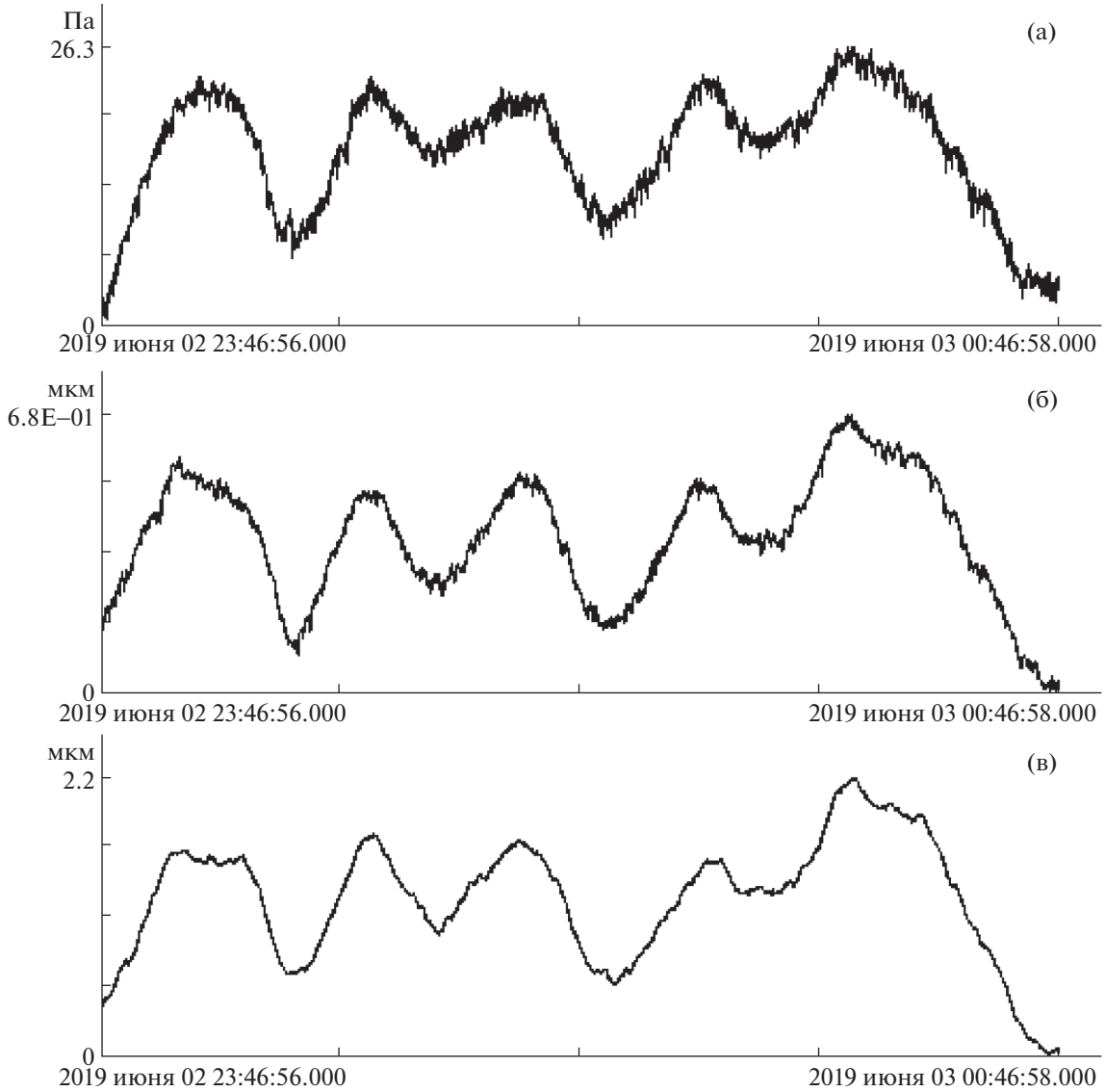

Рис. 1. Синхронные записи лазерного нанобарографа, 17.5-метрового лазерного деформографа, 52.5-метрового лазерного деформографа (сверху–вниз).

При анализе синхронных экспериментальных данных, полученных на лазерном нанобарографе и лазерных деформографах, были отобраны синхронные участки записей с практически полным совпадением. На рис. 1 приведен пример одного такого участка.

По синхронным записям можно точно определить вклад вариаций атмосферного давления в деформацию с последующим определением передаточного коэффициента. С целью ликвидации некоторых неточностей в определении передаточного коэффициента в конкретные месяцы года было выбрано большое число синхронных участков записей. По каждому случаю был определен передаточный коэффициент по формуле:

$$K = \frac{U_s}{U_n}, \tag{2}$$

где U_s, U_n – синхронные значения данных лазерного деформографа и лазерного нанобарографа, соответственно, в вольтах. В дальнейшем вычислен усредненный коэффициент для интересующего нас интервала времени. В качестве характерного примера приведем значения данного передаточного коэффициента, определенного по синхронным данным лазерного нанобарографа [7], лазерных деформографов с длинами плеч 52.5 и 17.5 м, установленных на м. Шульца Приморского края [8, 9], в период 1–2 и 20–25 июня 2019 г. Во всех трех установках применяются частотно стабилизированные гелий-неоновые лазеры с

долговременной стабильностью в девятом знаке. Основные технические характеристики лазерного нанобарографа: рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1000 Гц, точность измерения вариаций атмосферного давления 1 мПа. Основные технические характеристики лазерных деформографов с длинами измерительных плеч 52.5 и 17.5 м: рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 100 Гц, точность измерения смещений на базе приборов 0.03 нм. Посуточные усредненные передаточные коэффициенты для лазерного деформографа с длиной плеча 17.5 м равны: 0.37, 0.40, 0.42, 0.46, 0.43, 0.40, 0.39, 0.38. То есть усредненный коэффициент для июня 2019 г. можно взять равным 0.41 для лазерного деформографа с длиной плеча 17.5 м. Для лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м установили следующие передаточные коэффициенты: 1.08, 1.14, 1.19, 1.14, 1.24, 1.12, 1.07, 1.05. Т.е. усредненный коэффициент для июня 2019 г. можно взять равным 1.13 для лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м. Как видно из вышеприведенных данных, величины коэффициентов не постоянны. Для 17.5-метрового лазерного деформографа отклонения составляют до 24%, а для лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52.5 м – до 18%. Эти отклонения, по-видимому, связаны с изменениями скорости сдвиговых волн, которые отрицательно коррелируют с количеством осадков и показателем влажности почвы. Как утверждается в работе [10], изменения данных скоростей в верхних 2 м почвы могут достигать 40%. Данные скорости зависят от величин коэффициентов Ламе и плотности среды распространения. Как видно из формулы (1), для точного определения вклада вариаций атмосферного давления в деформацию верхнего слоя земной коры необходимо знать точные значения коэффициентов Ламе в конкретное время для конкретного места, т.е. необходимо знать вариации коэффициентов Ламе. Эти вариации могут быть существенными, что связано не только с влажностью и обилием осадков, но и для нашего региона с временами года. В качестве доказательства данного утверждения определим передаточные коэффициенты для конца декабря 2019 г. Для 17.5-метрового лазерного деформографа они равны: 0.66, 0.70, 0.73, 0.71, 0.69. То есть усредненный передаточный коэффициент для декабря 2019 г. для лазерного деформографа с длиной плеча 17.5 м равен 0.70. Для 52.5-метрового лазерного деформографа передаточные коэффициенты равны: 0.86, 0.82, 1.00, 0.98, 1.05. То есть усредненный передаточный коэффициент для декабря 2019 г. для лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м равен 0.94. При сравнении усредненных передаточных коэффициентов за июнь и декабрь 2019 г. видно, что для лазерного деформографа с длиной плеча 17.5 м он увеличился почти в 1.71 раза, а для лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м он уменьшился в 1.20 раза. Устои данных лазерных деформографов расположены на различных породах и на различной глубине. Один из устоев лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м расположен на скале, а другой устой – на разрушенной скале с глубиной около 5 м от поверхности земли. Оба устоя лазерного деформографа с длиной плеча 17.5 м расположены на суглинке при глубине около 2–2.5 м от поверхности земли. В соответствии с формулой (1) можно утверждать, что в зимний период (декабрь 2019 г.) произошло сильное уменьшение коэффициентов Ламе пород, на которых расположены устои 17.5-метрового лазерного деформографа, что привело к тому, что одни и те же вариации атмосферного давления вносят более значительный вклад в деформацию верхнего слоя земной коры зоны расположения лазерного деформографа. Нельзя сбрасывать со счетов и то, что вследствие отрицательных температур воздуха (до –20°С) изменяется и плотность пород. Для лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м наблюдается другое, хотя и небольшое, изменение передаточного коэффициента, что связано с расположением устоев лазерного деформографа. Устой, расположенный на скале, находится в отдельном подземном помещении, в котором в зимний период значительно уменьшается влажность, что приводит к увеличению скоростей волн, т.е. к увеличению отношения коэффициентов Ламе к плотности пород. Это увеличение коэффициентов Ламе, согласно формуле (1), приводит к тому, что одно и то же изменение атмосферного давления в декабре приводит к меньшим деформациям в земной коре зоны расположения лазерного деформографа. Основание другого устоя 52.5-метрового лазерного деформографа расположено на такой глубине, что отрицательные температуры на него не влияют.

В заключение продемонстрируем эффект учета передаточного коэффициента при обработке синхронных экспериментальных данных, полученных на лазерном нанобарографе и лазерном деформографе. 25 марта 2020 г. в 02 ч 49 мин гринвичского времени (05 ч 49 мин московского времени) восточнее Курильских островов произошло землетрясение (в эпицентре очень сильное по шкале ШСИ-17) с $M = 7.5$. Данное землетрясение было зарегистрировано 52.5-метровым лазерным деформографом, расположенным на м. Шульца. По записям лазерного нанобарографа и лазерного деформографа определен усредненный передаточный коэффициент для этих суток, который равен 1.22, который в дальнейшем использовался для оценки вклада вариаций атмосферного давления в деформацию верхнего слоя земной коры зоны расположения лазерного деформографа. На рис. 2 (верхний график) приведен участок исходной записи лазерного деформо-

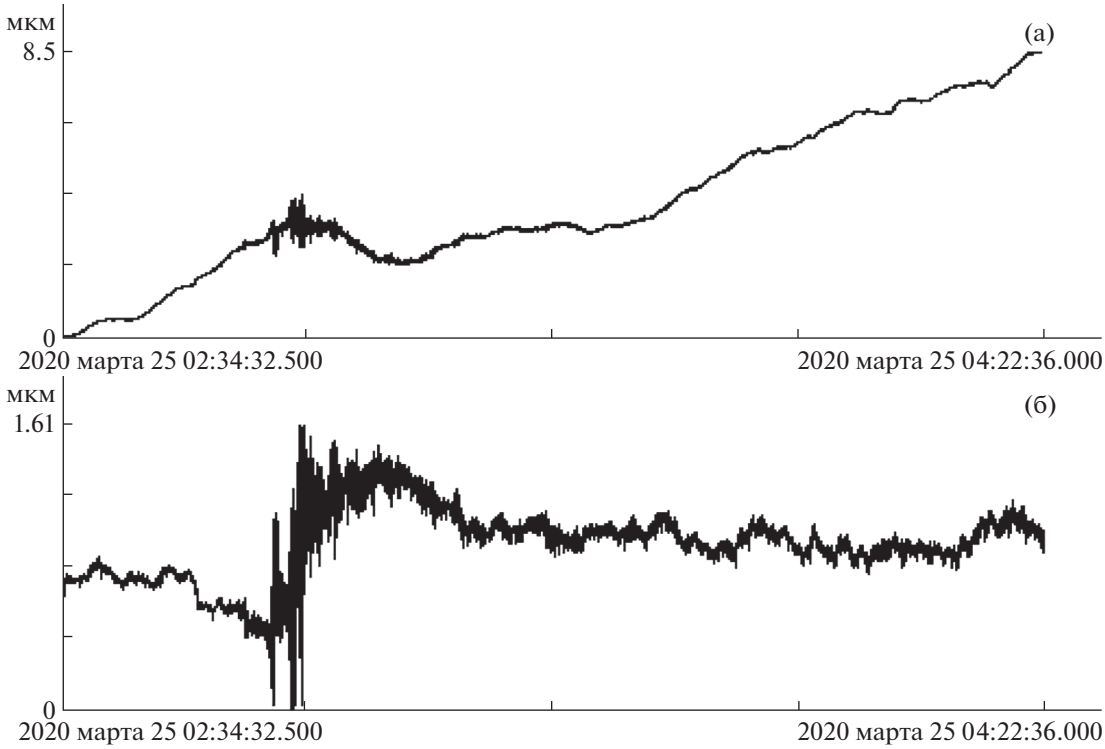

Рис. 2. Исходная запись лазерного деформографа (верхний график) и запись лазерного деформографа после вычета вклада в деформацию верхнего слоя земной коры вариаций атмосферного давления (нижний график).

графа, а на рис. 2 (нижний график) приведен участок записи лазерного деформографа после вычета вклада вариаций атмосферного давления.

Как видно из нижнего графика, приведенного на рис. 2, после начала землетрясения возникла деформационная аномалия (деформационная ступенька), которая характеризует смещение морского дна в эпицентре землетрясения. Эта деформационная аномалия, согласно работам [11, 12], свидетельствует о возникновении цунами, которое генерируется зарегистрированной подвижкой морского дна. Волна цунами пришла в Северо-Курильск в 15 ч 15 мин (4 ч 15 мин по Гринвичу), высота которой составила около 50 см. По данным лазерного деформографа можно было утверждать, что будет цунами уже в 03 ч 01 мин (по Гринвичу), т.е. за 1 ч 14 мин до прихода ее в Северо-Курильск.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств РФФИ (проект № 18-05-80011, опасные явления) и Министерства науки и высшего образования (тема госзадания “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Василевская Л.Н., Лисина И.А.* Атмосферно-литосферное взаимодействие в минутном диапазоне периодов // ДАН. 2020. Т. 490. № 1. С. 22–26.
2. *Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Геомеханические модели и ионосферные вариации, ассоциированные с сильными землетрясениями под действием слабых градиентов атмосферного давления // ДАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
3. *Гохберг М.Б., Колосницын Н.И.* Триггерные механизмы землетрясений / В сб.: “Триггерные эффекты в геосистемах” (под ред. В.В. Адушкина и Г.Г. Кочаряна). М. “ГЕОС”. 2010. С. 42–52.
4. *Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Морские внутренние волны и атмосферные депрессии // ДА. 2015. Т. 462. № 5. С. 601–604.
5. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // Физика Земли. 2012. № 3. С. 3–21.
6. *Zurn W., Ferreira A.M.G., Widmer-Schnidrig R., Lentas K., Rivera L., Clevede E.* High-quality Lowest-frequency Normal Mode Strain Observations at the Black Forest Observatory (SW-Germany) and Comparison with Horizontal Broad-band Seismometer Data and Synthetics // Geophys. J. Int. 2015. V. 203. P. 1787–1803.

7. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В.* Лазерный нанобарограф и его применение при его изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.
8. *Валентин Д.И., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К.* Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли. 2002. № 8. С. 69–73.
9. *Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В.* Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.
10. *Roumelioti Z., Hollender F., Guéguen P.* Rainfall-induced Variation of Seismic Waves Velocity in Soil and Implications for Soil Response: What the ARGONET (Cephalonia, Greece) Vertical Array Data Reveal // Bull. Seismol. Soc. Am. 2020. V. 110. № 2. P. 441–451.
11. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // ДАН. 2007. Т. 412. №1. С. 104-106.
12. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // ДАН. 2007. Т. 417. № 1. С. 109-112.

ACCOUNTING FOR THE EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ON THE DEFORMATION OF THE EARTH'S CRUST

Academician of the RAS G. I. Dolgikh[a, #] and S. G. Dolgikh[a]

[a] *Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*
[#] *E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

A method for estimating the contribution of atmospheric pressure variations to the deformation of the upper layer of the Earth's crust using synchronous data from laser nanobarographs and laser deformographs is described. Some examples demonstrate the winning points of using this technique in the analysis of the obtained experimental data.

Keywords: atmospheric pressure, deformation of the earth's crust