

Научная статья
УДК 531:550.3
DOI: 10.31857/S0869769824020053
EDN: ldlrve

Тектонические деформации в вулканическом поясе Курило-Камчатской дуги перед землетрясениями с $M \sim 7,0$ в зоне субдукции

В. М. Ившин

Владимир Максимович Ившин
пенсионер
Московская область, Протвино, Россия
vladimir.m.ivshin@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются градиенты смещения в поверхностном слое Земли, создаваемые весом вышележащих горных пород, и градиент смещения в поверхностном скальном массиве, возникающий под действием тектонических сил перед землетрясением в зоне субдукции. Делается оценка величины деформаций перед землетрясениями с $M \sim 7,0$.

Ключевые слова: рыхлые отложения, скальный массив, градиент смещения, тектонические деформации, тектоническое давление, геомеханический датчик, вулканический пояс, очаг землетрясения, зона субдукции

Для цитирования: Ившин В. М. Тектонические деформации в вулканическом поясе Курило-Камчатской дуги перед землетрясениями с $M \sim 7,0$ в зоне субдукции // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 54–61. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020053>, EDN: ldlrve

Original article

Tectonic deformations in the volcanic belt of Kurilo-Kamchatsky arc before earthquakes with $M \sim 7,0$ in zone subduction

V.M. Ivshin

Vladimir M. Ivshin
pensioner
Moscow Region, Protvino, Russia
vladimir.m.ivshin@gmail.com

Abstract. In the article is performed estimate of the value deformations, incipient in the surface rocky massif of volcanic belt of Kurilo-Kamchatsky arc before earthquakes with $M \sim 7,0$ in zone subduction.

Keywords: loose sediments, rocky massif, gradient of displacemen, tectonic deformations, tectonic pressure, geomechanical sensor, volcanic belt, earthquake focus, zone subduction

For citation: Ivshin V.M. Tectonic deformations in the volcanic belt of Kurilo-Kamchatsky arc before earthquakes with $M \sim 7,0$ in zone subduction. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):54–61. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020053>, EDN: ldlrve

Введение

При многолетних светодальномерных наблюдениях на Камчатке не было обнаружено значимых тектонических деформаций, предвещающих землетрясения.

Это обстоятельство дало основания для предположения, что в вулканическом поясе Курило-Камчатской дуги тектонические деформации, обусловленные землетрясениями в акватории Тихого океана, малы.

Для проверки указанного предположения были проведены геомеханические исследования. В предлагаемой статье обсуждаются данные исследования и делается оценка величины тектонических деформаций в вулканическом поясе перед землетрясением с $M \sim 7,0$ в Авачинском заливе.

1. Градиенты смещения в поверхностном слое Земли, создаваемые весом вышележащих горных пород

1.1. Исходные представления

Поверхностный слой Земли испытывает давление вышележащих горных пород. Так как время релаксации данного слоя существенно меньше времени действия внешних сил, его можно рассматривать как вязкую жидкость. Вблизи земной поверхности вязкость указанного слоя с ростом глубины увеличивается в разы [1]. На основании этого можно утверждать, что в поверхностном слое под действием веса вышележащих горных пород возникает медленно меняющийся во времени градиент смещения. Оценим его величину в некоторой точке. Представляется естественным считать, что горизонтальное смещение u является линейной функцией времени. При этом очевидно, что оно будет тем значительнее, чем больше давление горных пород p и чем меньше их вязкость λ . Отсюда имеем:

$$u = \xi \frac{p}{\lambda} t, \quad (1.1)$$

где ξ – коэффициент пропорциональности.

Поскольку p и λ зависят от глубины z , получим

$$\frac{du}{dz} = \left(\frac{dp}{dz} - \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dz} p \right) \frac{\xi}{\lambda} t. \quad (1.2)$$

В рыхлых отложениях коэффициент вязкости относительно мал, поэтому можно ожидать выполнение неравенства:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dz} p \gg \frac{dp}{dz}. \quad (1.3)$$

Из (1.2) и (1.3) следует, что в поверхностном слое рыхлых отложений

$$\frac{du}{dz} \approx -\frac{\xi}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dz} pt. \quad (1.4)$$

В скальном массиве коэффициент вязкости очень большой. В нем может быть справедливо неравенство:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dz} p \ll \frac{dp}{dz}. \quad (1.5)$$

Из (1.2) и (1.5) следует, что в поверхностном слое скального массива

$$\frac{du}{dz} \approx \frac{\xi}{\lambda} \frac{dp}{dz} t. \quad (1.6)$$

1.2. Результаты наблюдений

Для доказательства справедливости соотношений (1.4) и (1.6) на Камчатке были выполнены наблюдения с помощью геомеханических датчиков. Датчики представляют собой прочно связанные со средой на глубине 50 м вертикальные гильзы длиной 2 м с внутренним диаметром ≥ 20 см, в которых для преобразования механического сигнала в электрический закреплены скважинные уровневые электролитические наклонмеры модели НИВ-1 длиной 1 м [2].

Из соотношений (1.4) и (1.6) следует, что горизонтальное смещение u , создаваемое весом вышележащих горных пород в поверхностном слое рыхлых отложений с глубиной уменьшается, а в поверхностном слое скального массива – увеличивается. Чтобы на опыте убедиться, что происходит именно так на глубине 50 м, необходимо и в рыхлых отложениях, и в скальном массиве на указанной глубине определить направление движения верхней части датчика относительно основания и сопоставить его с направлением, куда вмещающая среда имеет возможность смещаться.

Геомеханические датчики были созданы в долине р. Тополовая и на утесе Авачинской бухты (рис. 1). Поверхностный слой в районе тополовского датчика – рыхлые отложения, а в районе авачинского датчика – скальный массив. Полученные на дат-

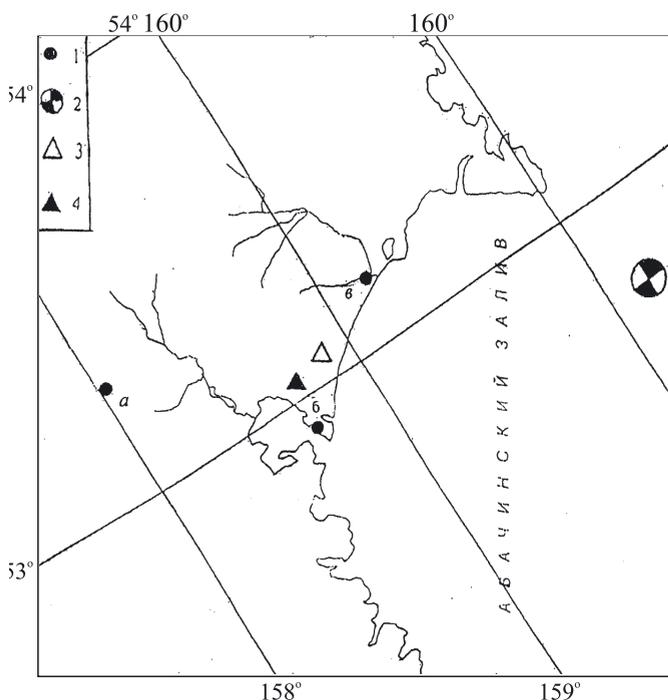


Рис. 1. Карта-схема района геомеханических исследований на Камчатке. 1 – геомеханические датчики, созданные: а – в долине р. Тополовая, б – на утесе Авачинской бухты, в – в устье р. Налычева; 2 – эпицентр землетрясения в Авачинском заливе 02.03.1992 г. с $M = 7,1$; 3 – геомеханический датчик на горе Толстый Мыс; 4 – геомеханический датчик на сопке Петровская

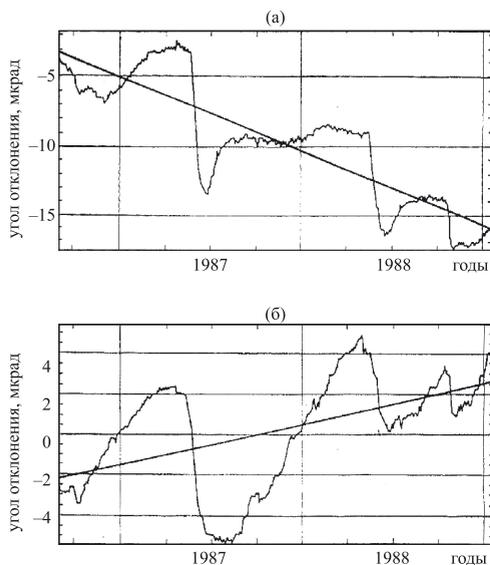


Рис. 2. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие градиент смещения, создаваемый весом вышележащих пород в долине р. Тополовая

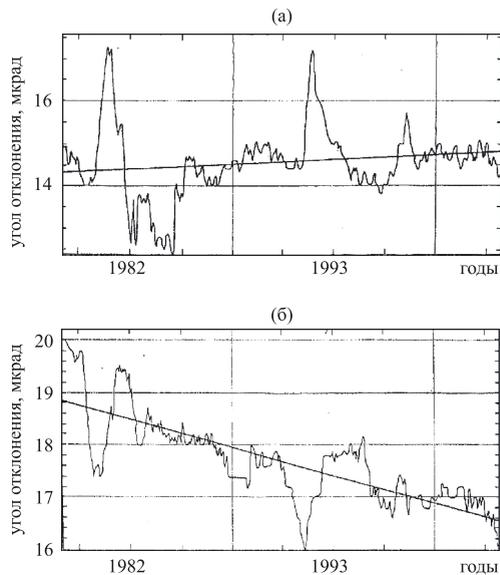


Рис. 3. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие градиент смещения, создаваемый весом вышележащих горных пород на утесе Авачинской бухты

чиках временные ряды показаны на рис. 2 и 3, на которых горизонтальные оси – оси времени, а вертикальные – оси углов отклонения датчиков от отвесной линии в направлении С–Ю и З–В. Увеличение рядов означает, что верхняя часть датчиков относительно основания в направлении С–Ю движется на юг, а в направлении З–В – на запад.

Наблюдения на тополовском датчике начались в сентябре 1986 г., а закончились в январе 1989 г. Временные ряды этого датчика приведены на рис. 2. На этом рисунке изображены также линейные тренды, которые были выделены из рядов методом наименьших квадратов. Видно, что тренд в направлении С–Ю уменьшается, а в направлении З–В – увеличивается. Значит, верхняя часть датчика относительно основания медленно двигалась на север и запад. Вмещающая среда в районе датчика может смещаться на север и запад, т.е. направление движения верхней части датчика совпадало с направлением смещения вмещающей среды. Таким образом, наблюдения на тополовском датчике свидетельствуют о том, что скорость горизонтального смещения среды в рыхлых отложениях на глубине 50 м с глубиной уменьшается.

Геомеханические наблюдения на утесе Авачинской бухты проводились с марта 1992 г. по апрель 1994 г. Временные ряды авачинского датчика и их линейные тренды приведены на рис. 3. Линейный тренд в направлении С–Ю увеличивается, а в направлении З–В – уменьшается. Следовательно, верхняя часть датчика относительно основания двигалась на юг и восток. Вмещающая среда на утесе Авачинской бухты в районе датчика имеет возможность смещаться на север и запад, т.е. направление движения верхней части Авачинского датчика было противоположно направлению смещения вмещающей среды. А это означает, что скорость горизонтального смещения среды в скальном массиве на глубине 50 м с глубиной увеличивается.

На рис. 2 и 3 видно, что градиенты смещения испытывают сильные колебания. Они не могли быть вызваны атмосферным давлением. Температура также не могла вызвать эти колебания. Температура на глубине 50 м практически постоянна. Например, на Камчатке, как показали наблюдения, температура на указанной глубине равна +4 °С, и изменяется она в течение года меньше чем на 0,1 °С.

Покажем, что наблюдаемые колебания градиентов смещения вызваны изменением уровня грунтовых вод. Скорость движения грунтовых вод весьма мала, так что скоростным напором можно пренебречь. В этом случае сила dF , с которой поток грунтовых вод действует на направленный вдоль него элемент поверхностного слоя длиной dl и площадью поперечного сечения ds , описывается соотношением:

$$dF = -\gamma_0 dH ds,$$

где dH – разность пьезометрических напоров для крайних сечений элемента поверхностного слоя, γ_0 – удельный вес воды.

Гидродинамическое давление p_d определяется при делении силы dF на объем рассматриваемого элемента:

$$p_d = \frac{dF}{ds dl} = -\frac{\gamma_0 dH ds}{ds dl} = -\gamma_0 \frac{dH}{dl}. \quad (1.7)$$

Пьезометрический напор H в некоторой точке грунтового потока можно представить в виде суммы среднего за год напора H_0 и сезонно меняющегося напора ΔH . Имеем

$$H = H_0 + \Delta H = H_0 \left(1 + \frac{\Delta H}{H_0} \right). \quad (1.8)$$

На основании (1.7) и (1.8) получаем

$$p_d = -\gamma_0 \frac{d}{dl} H_0 \left(1 + \frac{\Delta H}{H_0} \right). \quad (1.9)$$

Из соотношения (1.9) следует, что чем меньше $\Delta H / H_0$, тем меньше временные изменения гидродинамического давления p_d .

Чтобы убедиться в этом, был создан геомеханический датчик в устье р. Налычева, где уровень грунтовых вод меняется мало (рис. 1). На рис. 4 показаны временные ряды, которые были получены на налычевском датчике в период с ноября 1992 г. по апрель 1994 г., и их линейные тренды. Назначение осей на рисунке и связь изменения рядов с движением верхней части датчика те же, что на рис. 2 и 3.

Среднеквадратичные отклонения рядов от линейных трендов не превышают ошибки измерения. А это значит, что колебания градиентов смещения на рис. 2 и 3 вызваны грунтовыми водами.

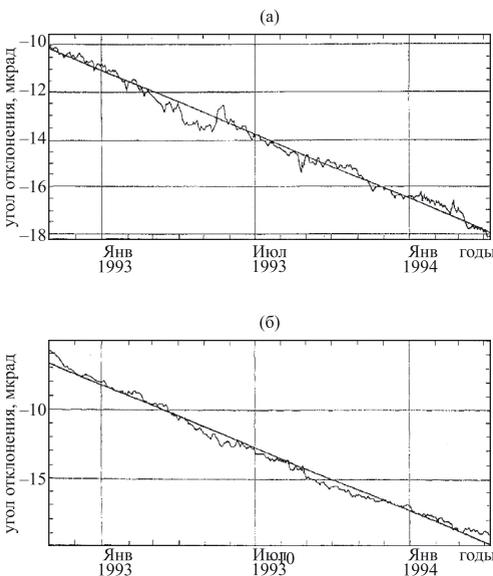


Рис. 4. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие градиент смещения, создаваемый весом вышележащих горных пород в устье р. Налычева

2. Градиент смещения в поверхностном скальном массиве вулканического пояса Курило-Камчатской дуги, возникающий перед сильным землетрясением в зоне субдукции

2.1. Исходные представления

Перед землетрясением в зоне субдукции фронтальная часть Курило-Камчатской дуги, расположенная между вулканическим поясом и субдуцирующей Тихоокеанской плитой, под нагрузкой океанской плиты изгибается на вулканическом поясе как на упругом основании [3]. Вследствие этого в вулканическом поясе в поверхностном скальном массиве создается напряженное состояние, которое в системе координат XYZ (ось Z – вертикальна) характеризуют соотношения [4]:

$$\sigma_x = \lambda\Delta + 2G\varepsilon_x, \sigma_y = \lambda\Delta + 2G\varepsilon_y, \sigma_z = \lambda\Delta + 2G\varepsilon_z. \quad (2.1)$$

Здесь σ – напряжение, ε – деформация, $\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – объемная деформация. Коэффициенты λ и G :

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, G = \frac{E}{2(1 + \nu)},$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Около земной поверхности напряжения (2.1) из-за невозможности бокового расширения вызывают одноосную деформацию вдоль некоторой оси X. Из (2.1) имеем

$$\sigma_x = (\lambda + 2G)\varepsilon_x, \sigma_y = \lambda\varepsilon_x, \sigma_z = \lambda\varepsilon_x. \quad (2.2)$$

На основании (2.2) получаем

$$\varepsilon_x = \frac{p}{K}, \quad (2.3)$$

где $p = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$ – тектоническое давление, $K = (3\lambda + 2G) / 3 = E / 3(1 - 2\nu)$ – объемный модуль.

При появлении тектонического давления (2.3) скальный массив под некоторой горой деформируется. В результате этого на участке деформирования l от проекции вершины горы до проекции подножия горы на глубине 50 м происходит смещение:

$$u_x = \int_0^l \varepsilon_x dx = \int_0^l \frac{p}{K} dx = \frac{\bar{p}}{\bar{K}} l, \quad (2.4)$$

где \bar{p} и \bar{K} – средние на отрезке l значения давления p и объемного модуля K .

Рассматриваемый скальный массив мощностью 50 м сложен трещиноватыми горными породами. Под действием веса вышележащих пород трещиноватость массива с ростом глубины уменьшается, вследствие чего его модуль упругости \bar{K} увеличивается в разы [1]. Так как при этом \bar{p} вблизи земной поверхности практически не меняется, то при смещении u_x возникает градиент смещения:

$$\frac{du_x}{dz} = -\frac{\bar{p}}{\bar{K}^2} \frac{d\bar{K}}{dz} l. \quad (2.5)$$

2.2. Результаты наблюдений

Из (1.6) следует, что градиент смещения, возникающий в поверхностном скальном массиве под действием веса вышележащих горных пород, не зависит от давления. Поэтому, как видно из (2.5), наблюдения за градиентом смещения в скальном массиве позволят обнаружить появление тектонического давления \bar{p} . Правда, это можно реализовать практически, только если l не является малой ве-

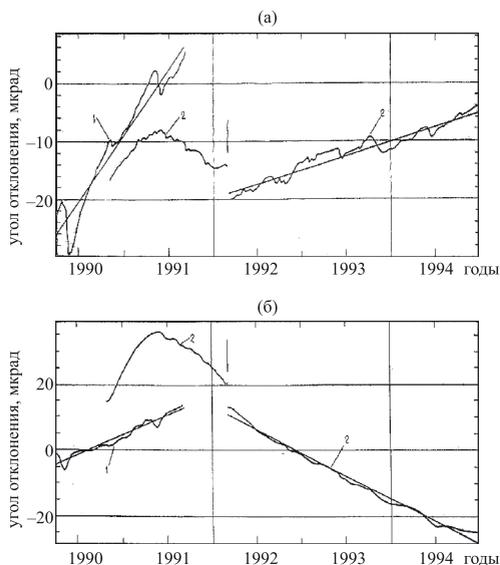


Рис. 5. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие изменение вертикального градиента горизонтального смещения на горе Толстый Мыс (1) и сопке Петровская (2). Стрелкой указан момент землетрясения 2 марта 1992 г. с $M = 7,1$

должен был реагировать так же, как и датчик на Петровской сопке.

В период наблюдения на созданных датчиках, а именно 2 марта 1992 г., в Авачинском заливе на расстоянии около 100 км от датчиков произошло сильное землетрясение с $M = 7,1$ ($\varphi = 52,76^\circ\text{N}$, $\lambda = 160,20^\circ\text{E}$, $h = 20$ км) [5]. Полученные временные ряды (рис. 5) свидетельствуют, что перед Авачинским землетрясением появление тектонического давления зафиксировал только датчик, расположенный у подножия Петровской сопки.

Заключение

Временные ряды на рис. 5, полученные на Петровской сопке перед Авачинским землетрясением 2 марта 1992 г. с $M = 7,1$, характеризуют изменение тектонического давления в поверхностном слое вулканического пояса Курило-Камчатской дуги перед сильным землетрясением в зоне субдукции. Как видно на рис. 5, давление сначала увеличивалось, а потом плавно уменьшалось. Это означает, что нагрузка в очаге перед землетрясением росла, а достигнув максимума, стала падать, что указывает на развитие в очаге квазипластических деформаций и, следовательно, на приближение землетрясения.

В этой связи оценим (в среднем) величину деформации в поверхностном слое вулканического пояса во время роста и падения нагрузки в очаге перед Авачинским землетрясением.

Смещение верхней части геомеханического датчика относительно его основания во время роста давления, т. е. при сжатии Петровской сопки в период с октября 1990 г. до июня 1991 г., в направлении С–Ю было равно 5,9 мкм, а в направлении

личной. Чтобы на опыте проверить справедливость данных утверждений, на Камчатке были проведены наблюдения с помощью двух геомеханических датчиков (рис. 1). Один датчик размещался в скальном массиве у подножия Петровской сопки высотой 468 м на расстоянии примерно 1 км от ее вершины, второй датчик – в скальном массиве на горе Толстый Мыс высотой 249 м вблизи ее вершины. На Петровской сопке датчик был установлен там, где под действием веса вышележащих пород его сигнал в направлении С–Ю увеличивается, а в направлении З–В уменьшается. Рост тектонического давления должен был вызывать в общем случае нелинейное увеличение сигнала датчика и в направлении С–Ю, и в направлении З–В, а падение давления – нелинейное уменьшение сигналов датчика в указанных направлениях. На горе Толстый Мыс датчик был установлен там, где под действием веса вышележащих пород его сигналы увеличивались и в направлении С–Ю, и в направлении З–В. На рост и падение тектонического давления он

З–В – 26,3 мкм. Суммарное смещение равнялось 26,9 мкм и имело геодезический азимут 255°. Следовательно, оно было вызвано тектоническими силами, возникшими в районе очага землетрясения.

Смещение верхней части геомеханического датчика относительно его основания во время падения давления, т.е. при расширении Петровской сопки в период с июня 1991 г. до 2 марта 1992 г., в направлении С–Ю было равно, 8,8 мкм, а в направлении З–В – 5,3 мкм. Суммарное смещение равнялось 10,3 мкм. Имея азимут 30°, оно было направлено нормально к продольной оси Петровской сопки.

Найденные смещения позволяют определить величину тектонических деформаций в поверхностном слое вулканического пояса перед Авачинским землетрясением. Расстояние между вершиной Петровской сопки по горизонтали и геомеханическим датчиком равно 1 км. Следовательно, деформация при росте давления была равна $2,7 \cdot 10^{-8}$. Полную величину деформации при росте давления определить невозможно, так как неизвестно время начала роста давления. Изменение же деформации при падении давления, то есть в период от максимума давления до момента землетрясения, не превышает $1,0 \cdot 10^{-8}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С. и др. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1973. 386 с.
2. Ившин В. М. Сквaziнный наклонмер НИВ-1 // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 105–112.
3. Ившин В. М. Результаты геомеханических исследований на Камчатке // Вестн. ДВО РАН. 2021. № 1. С. 22–37.
4. Тимошенко С. П. Теория упругости. Л.-М.: ОНТИ, 1937. 451 с.
5. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Левина В. И. и др. Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда MLH = 7,1) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С. 48–61.

REFERENCES

1. Sergeev E. M., Golodkovskaja G. A., Ziangirov R. S. i dr. Gruntovedenie. M.: Izd-vo MGU; 1973. 386 s. (In Russ.).
2. Ivshin V. M. Skvazhinnyj naklonomer NIV-1. *Vulkanologija i Sejsmologija*. 1993;(5):105–112. (In Russ.).
3. Ivshin V. M. Rezul'taty geomehanicheskikh issledovanij na Kamchatke. *Vestnik FEB RAS*. 2021;(1):22–37. (In Russ.).
4. Timoshenko S. P. Teorija uprugosti. L.-M.: ONTI; 1937. 451 s. (In Russ.).
5. Zobin V. M., Gordeev E. I., Levina V. I. i dr. Kamchatskoe zemletrjasenie 2 marta 1992 g. (maginituda MLH = 7,1) v Avachinskom zalive i svjazannye s nim javlenija. *Vulkanologija i Sejsmologija*. 1996;(6):48–61. (In Russ.).