

УДК 528.344:551.24.02

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

^{1,2}Нечаев Г.В., ^{1,2}Шестаков Н.В., ³Такахаша Х., ²Герасименко М.Д., ^{1,2}Сысоев Д.В.

¹ФГАОУ ВО Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,
e-mail: henley_grange@mail.ru;

²ФГБУН Институт прикладной математики Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток;

³Институт сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета, Саппоро

Действующая система предупреждения о цунами (СПЦ) в Курило-Камчатском регионе основана на применении сейсмических методов и не позволяет получить в режиме реального времени точные параметры очага землетрясения, необходимые для надежного прогнозирования цунами. Кроме того, сейсмическим методам свойственна недооценка магнитуды события при возникновении сильных землетрясений ($M_w > 8,0$), нередко происходящих в Курило-Камчатской зоне субдукции. В последние годы для решения вышеописанных проблем рядом зарубежных СПЦ широко применяются методы Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС-методы). Суть данной методологии заключается в инвертировании детектированных ГНСС-станциями косейсмических смещений в параметры очага землетрясения и последующем расчете начальных смещений морского дна и параметров цунами. В данной работе на примере Камчатского землетрясения 1952 г. $M_w 8,7-9,0$ рассматривается возможность применения ГНСС-методов в региональной СПЦ. Косейсмические смещения на местах расположения региональных ГНСС-станций, смоделированные программой Coulomb3.0 по опорной модели, были инвертированы с использованием различной точности их определения. По инвертированным плоскостям землетрясений далее были рассчитаны косейсмические смещения дна и сравнены со смещениями, соответствующими опорной модели. В результате определено, что инвертирование данных даже простой одноплоскостной моделью очага способно удовлетворительно описать реальный очаг, а соответствующие инвертированным очагам начальные движения морского дна довольно точно повторяют реальные смещения. Точности определения смещений в 3 см по горизонтали и 5 см вертикали достаточно для адекватной оценки параметров землетрясения. Таким образом, подтверждено, что применение ГНСС-методов и использование существующей региональной ГНСС-сети способны существенно улучшить надежность СПЦ при нынешних возможностях ГНСС-технологий.

Ключевые слова: ГНСС-методы, предупреждение о цунами, моделирование землетрясений, инверсия, косейсмические смещения

ON APPLICATION OF METHODS OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS FOR TSUNAMI EARLY WARNING IN THE KURIL-KAMCHATKA REGION

^{1,2}Nechaev G.V., ^{1,2}Shestakov N.V., ³Takahashi H., ²Gerasimenko M.D., ^{1,2}Sysoev D.V.

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: henley_grange@mail.ru;

²Institute for Applied Mathematics of Far Eastern branch of Russian Academy of Science, Vladivostok;

³Institute of seismology and volcanology of Hokkaido University, Sapporo

Current Kuril-Kamchatka region's tsunami warning system (TWS) is based on seismic methods that don't allow to get accurate seismic source parameters in real-time that are needed for precise tsunami forecast. In addition, seismic methods utilization lead to magnitude underestimation in case of strong earthquakes ($M_w > 8.0$) which often occur in the Kuril-Kamchatka subduction zone. Over the last years, methods of Global Navigation Satellite Systems (GNSS-methods) are applied for solving of abovementioned issues in a number of foreign TWSs. The core of methodology is inversion of coseismic displacements detected by GNSS-stations into the earthquake source parameters and following calculation of sea bottom displacements and tsunami characteristics. Possibility of GNSS-methods application for regional TWS is considering in this work as an example of 1952 Kamchatka earthquake $M_w 8.7-9.0$. Coseismic displacements at the locations of regional GNSS-stations modeled by Coulomb3.0 software and reference earthquake model were inverted according to different accuracy of offsets' determination. Next, coseismic displacements of sea bottom were calculated using inverted fault planes and were compared with offsets corresponding to reference model. It was defined that adaptation of simple single plane fault's model for inversion was possible to describe real source well. Initial sea bottom's movements corresponding to inverted planes can describe real offsets quite precisely. Accuracy of displacements' determination of 3 cm in horizontal plane and 5 cm in vertical plane is enough for adequate estimation of earthquake's parameters. Thereby, we confirmed that application of GNSS-methods and utilizing of existed regional GNSS-network is able to improve reliability of TWS significantly under current GNSS-techniques abilities.

Keywords: GNSS-methods, tsunami warning, earthquake modelling, inversion, coseismic displacements

Полуостров Камчатка и Курильские острова расположены в районе высокой сейсмической активности. Регулярные землетрясения происходят здесь в результате

сложного взаимодействия Тихоокеанской и Северо-Американской плит и Берингской и Охотской микроплит. Наиболее сильные землетрясения с магнитудой

до $M_w 9,0$ генерируются в Курило-Камчатской зоне субдукции, в зоне контакта Тихоокеанской и Охотской плит и являются наиболее частым источником цунами. Также регион подвержен воздействию телецунами, возникающих в результате катастрофических землетрясений, происходящих у берегов Северной и Южной Америки. Так, в 1960 г. высота заплесков Чилийского цунами на побережье Камчатки достигала 6 м [1]. Однако наиболее сильные и разрушительные для Курило-Камчатского побережья цунами генерируются именно в близлежащей одноименной зоне субдукции. Наиболее разрушительными в XX в. стали Камчатское землетрясение $M_w 8,7-9,0$ и цунами 1952 г., когда г. Северо-Курильск был разрушен и погибли более 2000 человек. В связи с этим случаем к 1958 г. была разработана региональная система предупреждения о цунами (СПЦ-1958). После трагических событий 2004 г., связанных с Суматра-Андаманским землетрясением и цунами, система была усовершенствована. Однако и сейчас она основана на использовании сейсмических методов, и ее главной задачей является определение магнитуды и местоположения сейсмического события. Подобный подход имеет значительные недостатки, главным из которых является недооценка магнитуды сразу после сильного землетрясения ($M_w > 8,0$) в связи с насыщением сигнала. Другим несовершенством таких систем является невозможность определения геометрических параметров сейсморазрыва, а также величины смещения в очаге.

В последние годы развивается принципиально новая методика определения параметров очага землетрясения в реальном времени, основанная на применении технологий Глобальной навигационных спутниковых систем (ГНСС). Суть метода заключается в использовании вызванных землетрясением косейсмических смещений, зафиксированных ГНСС-станциями, для определения магнитуды события и параметров очага, которые далее применяются для моделирования смещений морского дна и расчета характеристик цунами. Данный способ свободен от проблемы насыщения сигнала и потому хорошо работает в случае сильнейших землетрясений, которые происходят в зонах субдукции. Особенно активно системы, использующие ГНСС-методы, начали разрабатываться после 2004 и 2011 гг., когда действовавшие на тот момент СПЦ существенно недооценили магнитуду зем-

летрясений, что привело к огромным человеческим жертвам. На сегодняшний день существует несколько развивающихся и работающих систем раннего предупреждения о землетрясениях и цунами, основанных на ГНСС-методах: GITEWS (Индонезия), G-larmS и G-FAST (США), REGARD (Япония), из которых последняя является наиболее развитой и находится в опытной эксплуатации с 2017 г. [2]. Ретроспективная оценка магнитуды землетрясения Тохоку 2011 г. системой REGARD составила $M_w 8,7$, что намного ближе к реальной магнитуде $M_w 9,0$, чем оценка, полученная Японским Метеорологическим Агентством ($M_w 7,9$) сразу после события. Подобный опыт позволяет предположить перспективность использования ГНСС-методов для предупреждения о цунами в Курило-Камчатском регионе, что даст возможность сократить число ложных тревог и повысить надежность и скорость оценки опасности цунами.

В данной работе на примере Камчатского землетрясения 1952 г. $M_w 8,7-9,0$ рассмотрены возможность применения ГНСС-методов для целей предупреждения о цунами, а также влияние точности определения косейсмических смещений на оценку параметров землетрясения и движений морского дна.

Методология

Искомые параметры очага землетрясения получают посредством инверсии наблюдаемых косейсмических смещений. Таким образом, смещения на станциях наблюдений являются наиболее важной информацией для рассматриваемого типа систем. К сожалению, для события 1952 г. подобных данных не существует. Поэтому косейсмические смещения были смоделированы на местах положения действующих (либо прекративших работу по различным причинам) станций постоянных ГНСС-наблюдений региональных сетей (ДВО РАН, KamNET). Расчеты производились с помощью программного пакета *Colomb3.0*, в котором модель Земли представлена однородным полупространством с жесткостью $\mu = 3,5 \times 10^{10}$ [3]. В качестве опорной (эталонной) была использована многоплоскостная модель очага, определенная MacInnes [3] (рис. 1).

Согласно расчетам горизонтальные косейсмические смещения в ближней зоне землетрясения составляли десятки сантиметров, а на отдельных станциях достигли 2,5 м (рис. 1). Столь большие величины сме-

щений могут быть легко зафиксированы современными ГНСС-методами.

$$M_0 = \mu LWD, \quad (1)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10,7. \quad (2)$$

Для инверсии рассчитанных смещений применялся метод, предложенный Matsuura & Hasegawa [4], в котором так же, как и в Coulomb3.0, модель Земли представлена однородным полупространством. Данный способ является одним из наиболее распространенных; кроме того, он позволяет довольно быстро определить параметры землетрясения, что важно для целей раннего предупреждения о цунами. В качестве начальных параметров для инверсии была задана сейсмофокальная плоскость, соответствующая событию $M_w 7,5$ (длина $L = 70$ км, ширина $W = 37,6$ км, смещение $D = 2,17$ м, формулы 1, 2), центр которой соответствует положению эпицентра землетрясения, представленному в каталоге USGS (рис. 3). Остальные параметры заданы в соответствии с типичными значениями для зоны субдукции: направление простирания плоскости $str = 180^\circ$, угол падения

$dip = 15^\circ$ и направление дислокации в очаге $rake = 90^\circ$.

Поскольку указанные смещения в реальности отягощены ошибками измерений, необходимо присвоить смоделированным сдвигам точность их определения. Величины ошибок зависят от разных факторов, наиболее значимым из них является способ обработки ГНСС-данных. К примеру, используемый системой REGARD программный пакет RTK-lib позволяет определить горизонтальные смещения с точностью 5 см, вертикальные – 8 см. Однако существуют методы, например VADASE [5], способные достичь точности 5 мм в горизонтальной плоскости и 1,5 см по вертикали. Принимая во внимание существующие возможности ГНСС-технологий, в работе мы использовали три варианта точности определения косейсмических смещений: 1) 2 см и 4 см (условие I), 2) 3 см и 5 см (условие II), 3) 5 см и 8 см (условие III) по горизонтали и вертикали соответственно. Применяя разные величины ошибок измерений при инверсии одного и того же набора косейсмических смещений, мы выяснили, каким образом точность определения смещений влияет на результат инверсии.

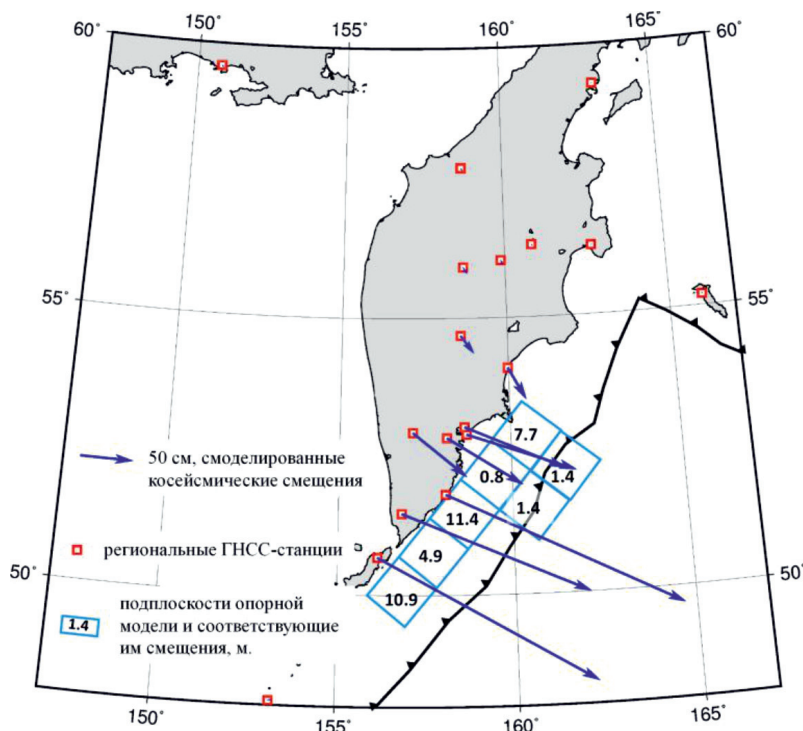


Рис. 1. Региональные ГНСС-станции (красно-белые квадраты) и соответствующие им косейсмические смещения (синие стрелки) рассчитанные по модели очага землетрясения Matsuura [3] (голубые квадраты). Цифрами обозначены смещения в каждой подплоскости (в метрах)

Таблица 1

Параметры инвертированных плоскостей землетрясений

Условия	h, км	L, км	W, км	str, °	dip, °	D, м	M _w
I	17,76663	362,5566	151,0067	204,2511	16,21113	8,65518	8,78
II	18,547	343,8774	144,2041	201,7034	15,80829	8,99657	8,76
III	18,79407	188,2681	110,3264	185,9245	15,52989	42,08663	8,95

Результаты инверсии

В результате инверсии были получены три сейсмофокальные плоскости (рис. 2), соответствующие каждому условию точности ГНСС-наблюдений. Их параметры (h – глубина верхнего края, L – длина, W – ширина, str – направление простирания, dip – угол падения, D – смещение в очаге) и моментные магнитуды, вычисленные по формулам 1, 2, приведены в табл. 1.

Согласно данным табл. 1 и рис. 2, а параметры инвертированных плоскостей I и II хорошо совпадают, их положение согласуется с положением подплоскостей референсной модели с максимальными смещениями. Однако положение плоскости III (рис. 2, б) не коррелирует с положением опорных плоскостей и плоскостей I и II. Таким образом, магнитуды всех инвертированных событий превосходят опорное значение.

Очевидно, что третье условие точности привело к значительной переоценке как магнитуды, так и величины смещения в очаге. Тем не менее при всех условиях опорное значение магнитуды было достигнуто путем инверсии косейсмических значений региональных ГНСС-станций, что свидетельствует об уверенном преодолении проблемы недооценки магнитуды, свойственной действующей СПЦ, с помощью ГНСС-методов. Стоит отметить, что моментная магнитуда, соответствующая опорной модели (опорная магнитуда), согласно формулам 1, 2 равна M_{w ref} 8,72. Магнитуда события, инвертированного по второму условию M_{w II} 8,76, является наиболее приближенной к M_{w ref}, несмотря на большие ошибки определений смещений, чем по условию I (3 и 2 см по горизонтали соответственно).

Расчет мгновенных смещений морского дна

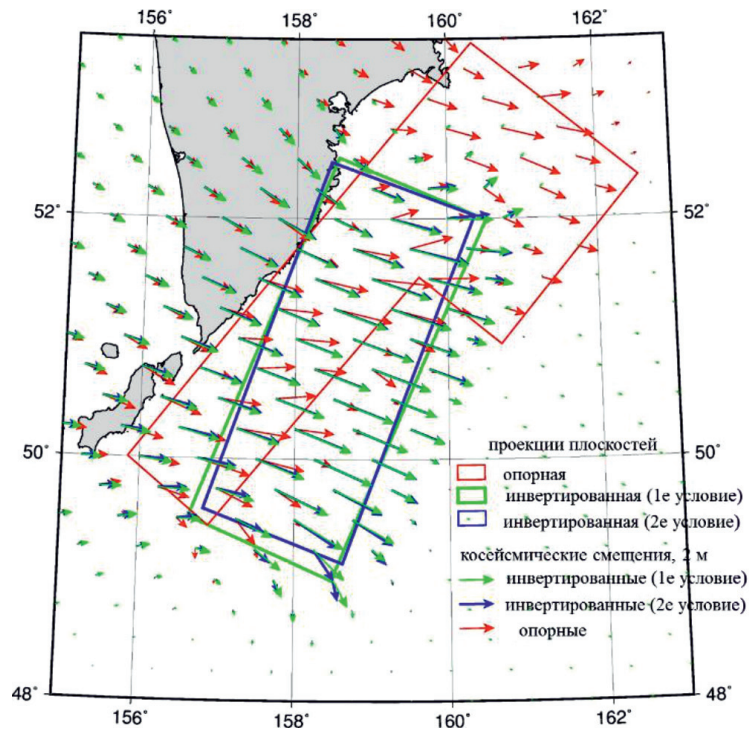
Косейсмические смещения морского дна непосредственно связаны с начальной высотой волны цунами и далее с высотами заплесков на побережье. Сравнивая инвертированные и опорные смещения дна (рас-

считанные по инвертированным и опорной моделям землетрясений соответственно), можно оценить, насколько успешно и надежно была произведена инверсия.

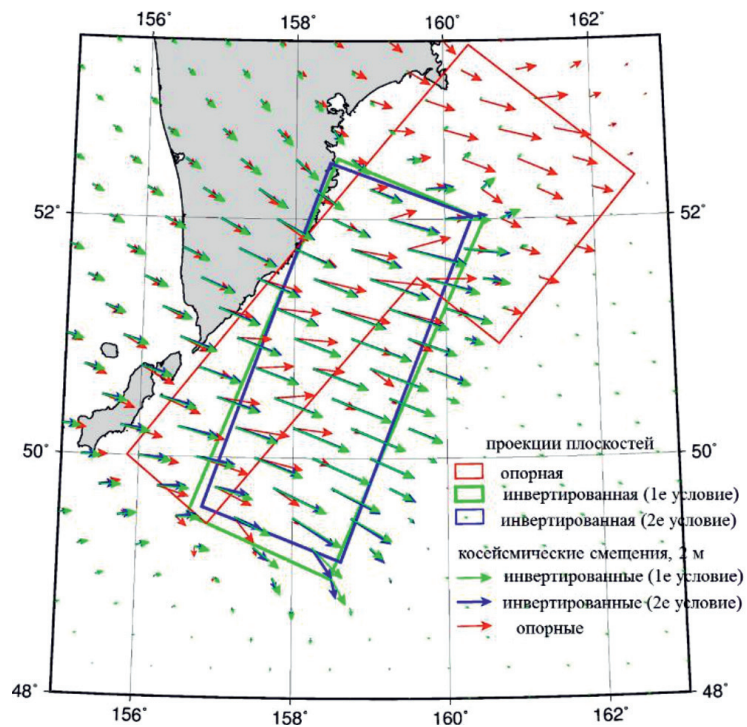
Для этих целей в ближней зоне землетрясения были рассчитаны поля косейсмических смещений, соответствующие опорной и инвертированным плоскостям сейсмо-разрывов (рис. 2). Согласно рис. 2, а условия I и II показывают примерно одинаковое распределение и величины горизонтальных смещений, поэтому далее из этих двух вариантов рассматриваться будет только условие II как менее требовательное к возможностям ГНСС-методов. Инвертированное по второму условию и опорное поля смещений частично соответствует. Наилучшее согласие горизонтальных смещений наблюдается в центральной части эталонной модели в местах наибольших смещений в очаге, а также в южной части п-ова Камчатка и северных Курильских островов. Значительные расхождения приходятся на места, где опорная и инвертированная модели не перекрывают друг друга: в северной части поля и к юго-востоку от опорной модели.

Данное разногласие легко объясняется невозможностью точного повторения сложной референсной модели одной плоскостью. Вертикальные смещения в целом неплохо соответствуют (рис. 3, а). Максимальные смещения практически идентичны (табл. 2). Инвертированное поле не описывает локальный максимум северной части опорного поля и расходится по долготе с южным максимумом за счет разности направлений простирания эталонной и инвертированных плоскостей.

Инвертированное по третьему условию поле горизонтальных смещений значительно расходится с опорным везде, кроме юга п-ова Камчатка. Некорректно определенные пространственные параметры события и значительно переоцененная величина дислокации в очаге привели к неадекватно завышенным величинам косейсмических смещений по горизонтали и вертикали.



а)



б)

Рис. 2. Смоделированные косейсмические смещения и инвертированные по ним плоскости очагов землетрясений. а) эталонная (красный контур) и инвертированные по I и II условиям (зеленый и синий прямоугольники соответственно) плоскости землетрясений. Эталонные (красные стрелки) и инвертированные по I и II условиям (зеленые и синие стрелки соответственно) косейсмические смещения; б) эталонная (красный контур) и инвертированная по III условию (синий прямоугольник) плоскости землетрясений. Эталонные (красные стрелки) и инвертированные по III условию (синие стрелки) косейсмические смещения

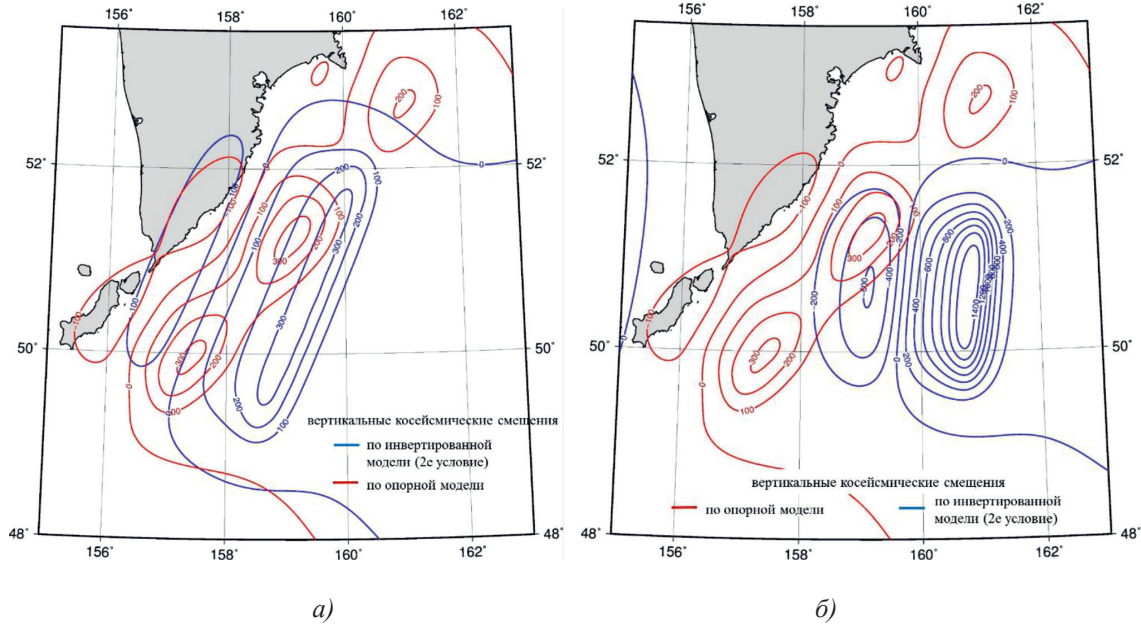


Рис. 3. Вертикальные косейсмические смещения: а) эталонные (красный контур) и инвертированные по II условию (синий контур), горизонталы проведены через 1 м; б) эталонные (красный контур, горизонталы проведены через 1 м) и инвертированные по III условию (синий контур, горизонталы проведены через 2 м)

Таблица 2

Максимальные горизонтальные и вертикальные косейсмические смещения, соответствующие опорной и инвертированным моделям очага

Модель землетрясения	Горизонтальные смещения, см	Вертикальные смещения, см
условие I	376,5	381,9
условие II	378,6	391,6
условие III	1483,6	1738,4
опорная модель	360,3	391,1

В табл. 2 представлены максимальные горизонтальные и вертикальные движения морского дна, соответствующие инвертированным и опорной плоскостям землетрясений.

Заключение

Расчитанные косейсмические смещения значительно превосходят по точности смещения, определенные ГНСС-методами, что делает их легко детектируемыми в режиме реального времени. Однако ошибки определения смещений значительным образом влияют на результаты инверсии. Расчеты показали, что точности определения в реальном времени косейсмических смещений в 3 см и 5 см в горизонтальной и вертикальной плоскостях достаточно для удовлетворительной

оценки параметров землетрясения, а главное, величины смещения в очаге.

Следует отметить, что данная работа опирается на реально существующие и существовавшие ГНСС-станции, которые могут быть использованы в перспективе для модернизации существующей СПЦ. Несмотря на простоту модели очага и методологии, использованной для инверсии, косейсмические смещения морского дна, посчитанные по инвертированной (условие I и II) и референсной моделям, очень близки, что позволяет получить близкие к реальным параметры цунами в источнике.

Таким образом, можно уверенно заключить, что уже сейчас ГНСС-методы могут быть использованы для целей раннего предупреждения о цунами в Курило-Камчатском регионе и решения ныне существующей проблемы недооценки магнитуды при сильных землетрясениях. Мы подтвердили, что существующее состояние ГНСС-технологий и ГНСС-сетей в регионе способно значительно улучшить надежность работы нынешней СПЦ.

Данная работа выполнена при поддержке Японско-Российского центра молодежных обменов, а также Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Список литературы / References

1. Пинегина Т.К., Базанова Л.И. Новые данные о параметрах исторических цунами на побережье Авачинского залива (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 3 (31). С. 5–17.

Pinegina T.K., Bazanova L.I. New data about parameters of historical tsunamis at the Avachinskii Bay (Kamchatka) // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2016. № 3 (31). P. 5–17 (in Russian).

2. Kawamoto S., Ohta Y., Hiyama Y., Todoriki M., Nishimura T., Furuya T., Sato Y., Yahagi T., Miyagawa K. RE-GARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2017. vol. 122. P. 1–26. DOI:10.1002/2016JB013485.

3. MacInnes B., Weiss R., Bourgeois J., and Pinegina T.K. Slip distribution of the 1952 Kamchatka Great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical records. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. vol. 100. no. 4. P. 1695–1709. DOI: 10.1785/0120090376.

4. Matsuura M., Hasegawa Y. A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints. *Physics of the Earth and planetary interiors*. 1987. vol. 47. P. 179–187.

5. Fratarcangeli F., Savastano G., Chiara D'Achille M., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio G. VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the central Italy 2016 earthquakes. *Remote sensing*. 2018. 10(8). 1201. P. 1–20. DOI: 10.3390/rs10081201.