

УДК 551.24:528.7 (202), К78

ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ И УРОВНЕМЕРНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ, ОКЕАНИЧЕСКИЕ ПРИЛИВНЫЕ МОДЕЛИ

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Максим Георгиевич Валитов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, тел. (423)231-1400, факс: (423)231-2573, e-mail: maxval@mail.ru

Бернард Дюкарм

Центр исследований Земли и климата Католического Университета Лоувэйна, 1340, Бельгия, Лоувэйн, профессор, e-mail: bf.ducarme@gmail.com

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Сергей Борисович Наумов

Региональный информационно-обрабатывающий центр «Владивосток», 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Мордовцева 3, зав. лабораторией, тел. (423)222-64-63, e-mail: revtrud@yandex.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Руслан Григорьевич Кулинич

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. (423)231-14-00, факс: (423)231-25-73

Татьяна Николаевна Колпащикова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, научный сотрудник, тел. (423)231-14-00, факс: (423)231-25-73

Зоя Николаевна Прошкина

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, научный сотрудник, тел. (423)231-14-00, факс: (423)231-25-73

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: danossov@ngs.ru

Расчет приливных поправок в геодезические и гравиметрические наблюдения важен при мониторинговых измерениях. Эксперименты на станциях юга Сибири и Дальнего Востока являются частью мировой системы земноприливных измерений. Здесь значение приливной деформации, соответствующей статической модели прилива, слабо осложнено динамическими эффектами океанов. Результаты изменяются при приближении к берегам океанов, где становятся значимыми океанические приливные нагрузки. В дополнение к проведенным ранее измерениям в районе Хабаровска и на острове Сахалин, в последние годы проведены многолетние циклы равномерных и гравиметрических измерений на станциях Посьет и Мыс Шульца (залив Посьет, берег Японского моря, юг Приморья). Приливный анализ выполнен на сериях длиной более двух лет. На основании полученных результатов проведен выбор приливных альтиметрических моделей океана.

Ключевые слова: приливные модели деформации Земли, альтиметрические приливные модели океана, приливная гравиметрия, измерения уровня моря.

**TIDAL EFFECTS BY GRAVITY AND SEA LEVEL OBSERVATION,
OCEAN TIDAL MODELS**

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyuga Pr., D. Sc., Chief of laboratory, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Maxsim G. Valitov

V. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 690041, Russia, Vladivostok, 43 Baltiiskai St., Ph. D., Chief of Laboratory, e-mail: maxval@mail.ru

Bernard Ducarme

Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research Catholic University of Louvain, 1340, Belgium, Louvain, Professor, e-mail: bf.ducarme@gmail.com

Dmitriy G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyuga Pr., Ph. D., Senior research fellow, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Sergey B. Naymov

Regional Information-Service Center «Vladivostok», 690041, Russia, Vladivostok, 3 Mordovtzeva St., Chief of laboratory, tel. (423)222-64-63, e-mail: revtrud@yandex.ru

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyuga Pr., Research fellow, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Ruslan G. Kulinich

V.II'ichev Pasific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 690041, Russia, Vladivostok, 43 Baltiiskai St., D. Sc., Professorial research fellow, tel. (423)231-14-00, fax: (423)231-25-73

Tatiana N. Kolpashikova

V.II'ichev Pasific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 690041, Russia, Vladivostok, 43 Baltiiskai St., Research fellow, tel. (423)231-14-00, fax: (423)231-25-73

Zoia N. Proshkina

V.II'ichev Pasific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 690041, Russia, Vladivostok, 43 Baltiiskai St., Research fellow, tel. (423)231-14-00, fax: (423)231-25-73

Igor S. Sizikov

Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyuga Pr., Engineer, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automation and Electrometry Siberian Branch Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyuga Pr., Engineer, e-mail: danossov@ngs.ru

Tidal corrections for gravity and geodesy observation are important for monitoring study. South Siberia and Far East observation is part of world tidal network. There tidal result agrees with static theory and it had weak ocean dynamical influence. Results change near coast, where observation at Khabarovsk and Sakhalin stations, are complete long-term observation at Poisiet level station and Shultz gravity station (Poisiet buy, Japan Sea coast, South part of Primoria, Far East of Russia). Tidal analyses were develop with two years series. Altimetric models was choose by observed results.

Key words: tidal models of Earth, altimetric tidal ocean model, gravity study, sea level observation variations.

Расчет приливных поправок в геодезические, геофизические и гравиметрические наблюдения необходим при мониторинговых измерениях на естественных и техногенных объектах. Известно, что приливы являются единственным геофизическим явлением, где априори с очень высокой точностью известна сила воздействия. Отношение масс «Земля – Луна» и «Земля – Солнце» определено с точностью $2 \cdot 10^{-6}$, а частота орбитального движения и ее вариации, такие как частота вращения Земли, известны до 7-й цифры. Измерение земных приливов имеет как научное, так и прикладное значение. Получаемые из результатов наблюдений амплитудный дельта-фактор и далее числа Лява h , k , l и их комбинация используются для расчета поправок в высокоточные гравиметрические наблюдения, в наблюдения космической геодезии (VLBI, GPS), для вычисления орбит спутников, при газовой съемке и в других геофизических измерениях, где учитываются эффекты на уровне деформаций 10^{-8} или соответствующих напряжений в земной коре (0,01 бар).

Современные модели приливной деформации Земли рассчитываются путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений для всей Земли [1–5]. Система состоит из уравнений движения, уравнения Пуассона и реологического соотношения «напряжение – деформация». Учитываются распределения по глубине: плотности, упругих модулей, притяжения и сжатия каждого слоя Земли. Приливы на Земле есть результат разности сил, приложенных на или внутри Земли и в ее центре масс. Это явление с очень длинной длиной волны и, следовательно, трудно выделяемой локальной и даже региональной составляющей. Приливы занимают частотный диапазон (периоды от 8 до 30 часов) между сейсмическими и собственными частотами (периоды меньше часа) и периодом движения полюса Земли (около 14 месяцев).

Известно, что в теории приливной деформации Земли различают статическую приливную реакцию (упругую) и динамическую, в частности – приливные эффекты в океане. При интерпретации современных высокоточных данных в области космической геодезии и гравиметрии следует учесть ряд эффектов, в частности, влияние океанических и атмосферных термических приливов. В современных исследованиях активно используются спутниковые альтиметрические данные. С помощью наземных измерений тестируются модели явления. Эти вопросы являются задачей нашего исследования.

Остановимся на примерах расчета влияния океана для станций, расположенных внутри континента (на расстояниях тысячи километров от побережья). Далее двигаемся на восток вплоть до побережья (станций, расположенных на берегу или в пределах нескольких сотен метров от берега моря), где становятся значимыми эффекты океана. Морские приливы и цунами являются наиболее значимыми эффектами в океане. Цунами генерируются неожиданными тектоническими движениями дна океана. Это возмущение возбуждает волну, которая распространяется со скоростью около $750 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$. Приливообразующая сила «обращается» вокруг Земли каждые 25 ч. Поскольку длина Земли по окружности составляет $3,7 \cdot 10^4 \text{ км}$, приливообразующая сила перемещается по экватору со скоростью $1\,500 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$, т. е. в 2 раза быстрее любой генерированной волны. Если бы океан имел глубину 20 км, возбуждающая сила и волновая реакция обладали бы одной и той же частотой. Но Мировой океан не настроен на частоту приливообразующих сил. В высоких широтах, где эти две частоты становятся равными, расположены Антарктический материк и широкий мелководный шельф Северного Ледовитого океана. Океан реагирует как скрипка в руках абстрактного импрессиониста. Её «струны» настроены на частоты приливообразующих сил, но «звуковой ящик» (резонатор) собран из ряда боксов различных форм и размеров. Поэтому некоторые части «звукового ящика» будут сильно резонировать с некоторыми «струнами». В результате резонансов приливы будут значительно отличаться по амплитуде [6–9] и частоте от места к месту (рис. 1).

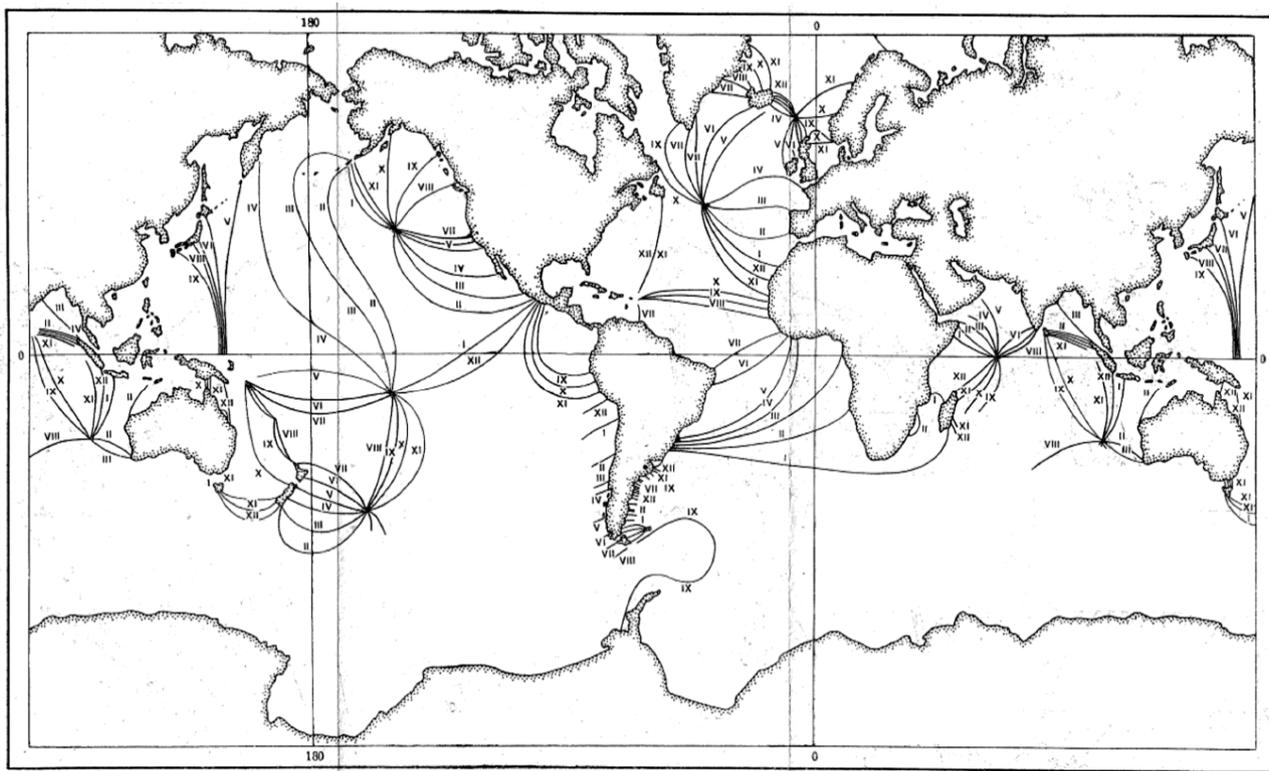


Рис. 1. Котидальная карта Мирового океана (полусуточная волна М2) [4].
Сплошные линии – изофазы в часах

Минимальное влияние мирового океана на расстояниях от побережья в 3 000 км можно проиллюстрировать на примере станции Талая (Байкальская рифтовая система, юго-западная ее часть, координаты 51.68°N , 103.65°E). На рис. 2 приведено сравнение модельных данных (модель Швидерского [6, 7]) с экспериментальными результатами (гравиметр ЛаКоста Ромберга G 402 с блоком обратной связи и цифровым накопителем). На этой станции, согласно экспериментальным данным по суточным (волны O1 и K1) и полусуточным волнам (M2), отклонение от статической приливной модели составляет меньше процента [10, 11, 12].

Смещаясь далее на восток, рассматривая влияние Тихого океана, отметим, что, во-первых, он ограничен континентами в его северной части, во-вторых, периоды свободных колебаний водных масс в большинстве его районов значительно превышают половину лунных суток. Первое обстоятельство изменяет место расположения узловых линий и пучностей меридианных стоячих волн, второе препятствует усилению полусуточных колебаний уровня в открытых его частях. Поэтому полусуточных приливов в большинстве районов Тихого океана меньше, чем в Атлантическом, а распределение типов приливов отличается большой сложностью (рис. 3). Со временем моделирование океанических приливов начинает проводиться по все более мелкой сетке: от градусов до десятой

доли градуса (10 км). Выполнение многолетних гравиметрических исследований на трансконтинентальном профиле позволило провести оценку существующих моделей приливной деформации Земли и приливных альтиметрических моделей [13–20] Мирового океана (SCW80, CSR3, FES95, ORI96, CSR4, FES02, GOT00, NAO99, TPX06). В результате исследований получены экспериментальные оценки приливных параметров восточной части России на пункте Забайкальское (южнее г. Хабаровска, 300 км от побережья) и пункте Южно-Сахалинск (в 40 км от побережья, остров Сахалин) [10, 11]. Минимальные значения остаточного вектора (экспериментальные результаты минус модельные оценки) получены при использовании модели приливной деформации Земли DDW99 [3–5] с учетом вязкости мантии и последней генерации моделей мирового океана: CSR4, NAO99, GOT00, FES02 и TPX06 [10–12].

Как видим из модельного распределения величины прилива (рис. 3), расчет эффектов на восточном побережье Азии сложен из-за наличия бухт, проливов, заливов и изрезанности берега.

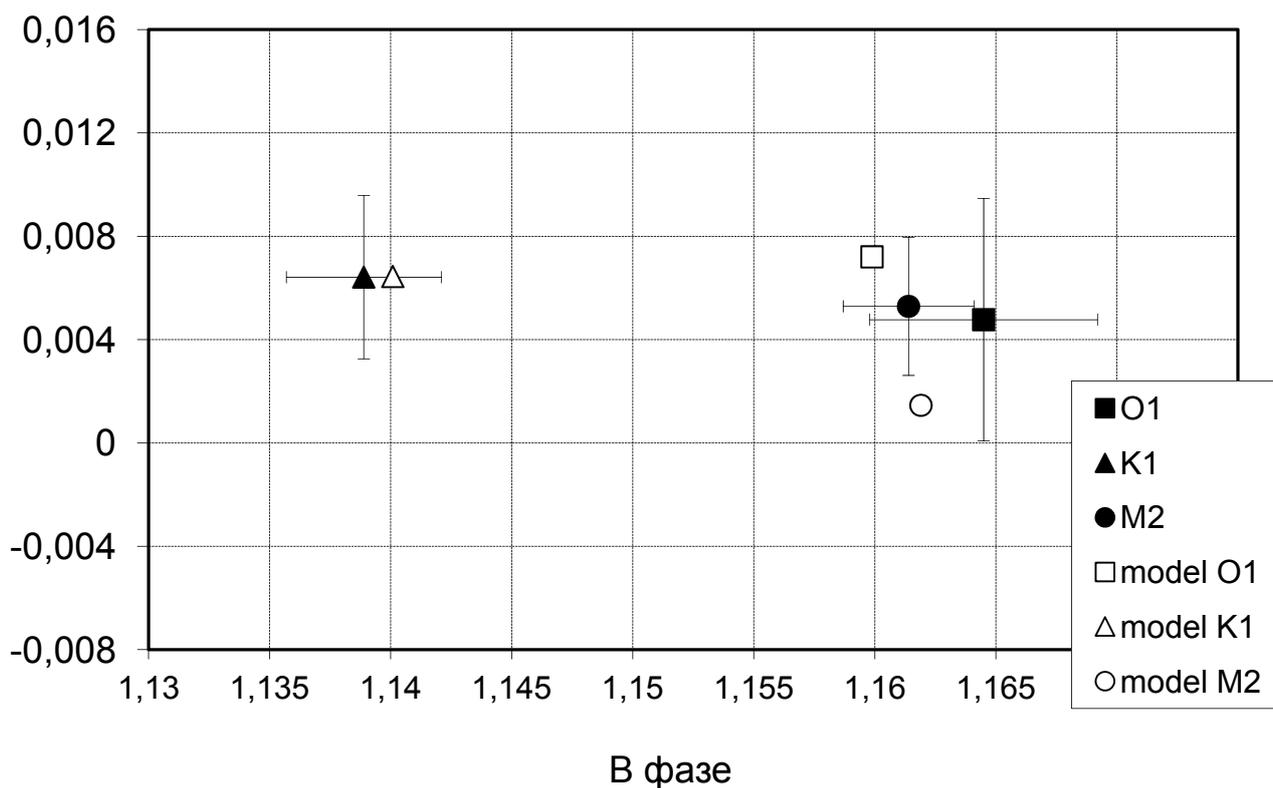


Рис. 2. Сравнение приливной модели и экспериментальных гравиметрических данных на станции Талая. Показана среднеквадратическая ошибка.

Отношение амплитуд – дельта-фактор $\delta = A_{\text{наблюденная}} / A_{\text{теоретическая}}$, фазовый сдвиг α в градусах – это разность фазы, полученной из приливного анализа и теоретической фазы волны.

По осям в фазе: $\delta \cos \alpha$ и вне: $\delta \sin \alpha$
(динамический эффект – океанический вклад)

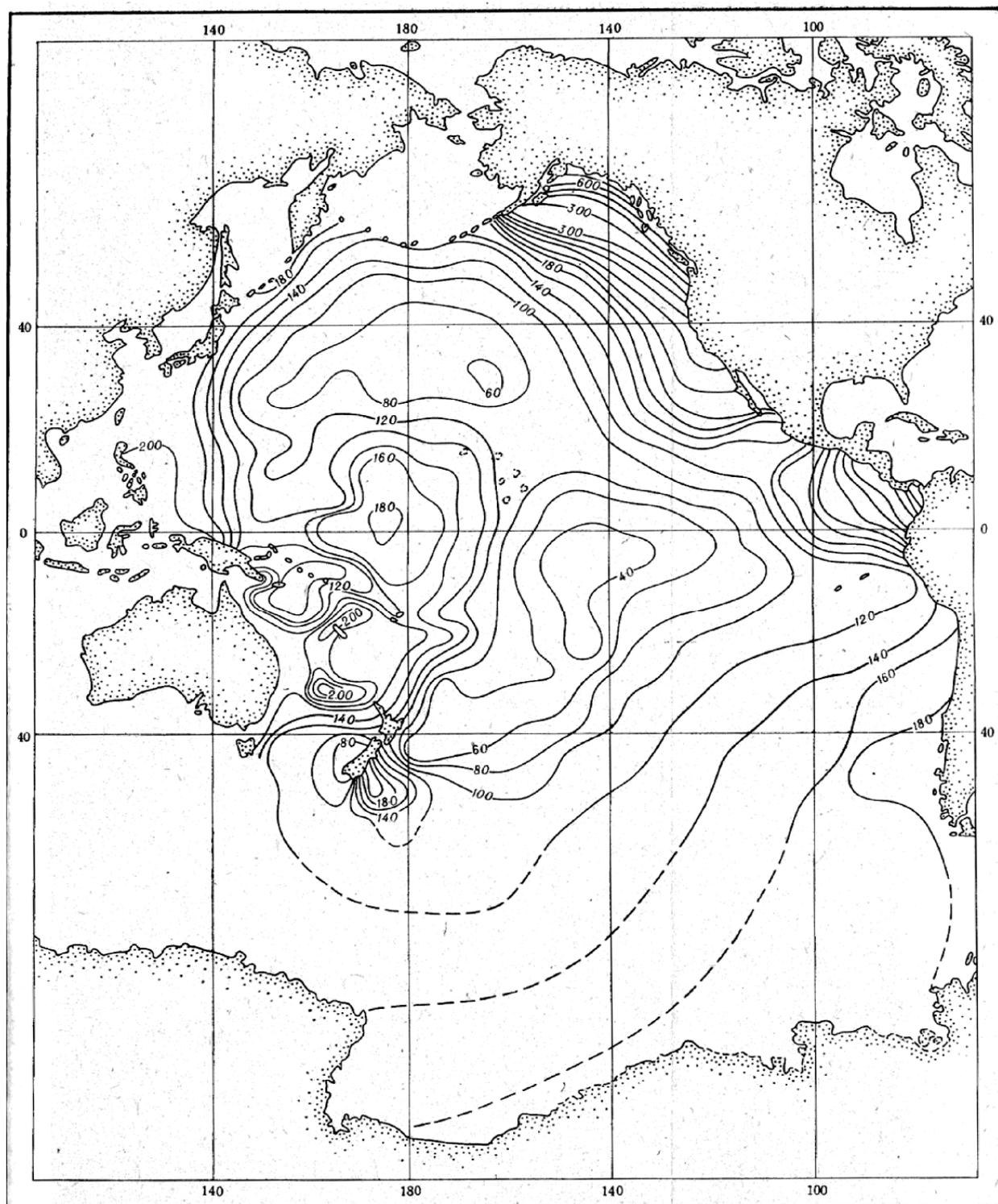


Рис. 3. Максимально возможная величина прилива (в сантиметрах) на акватории Тихого океана

В последние годы с помощью современных цифровых гравиметров проводится мониторинг поля силы тяжести на станции мыс Шульца (полуостров Гамова, юг Приморья, ТОИ РАН, 42.58°N, 131.16°E, 150 м от берега Японско-

го моря). Выбор приливной модели океана для расчета поправок в результаты проведен на основании анализа данных уровнемерной приливной станции мониторинга цунами, расположенной в заливе Посъета (координаты пункта наблюдений 42.65°N , 130.88°E). Положение станции наблюдения показано на рис. 4.

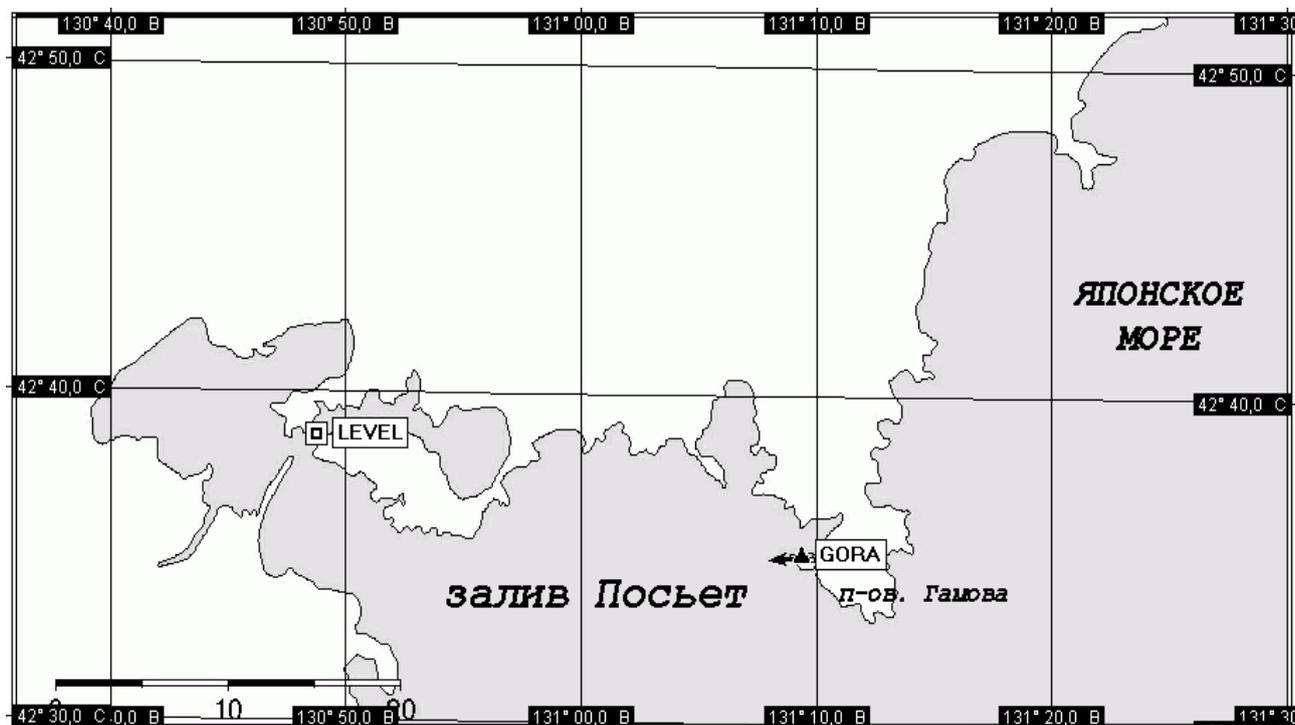


Рис. 4. Положение станций приливных наблюдений (пункт Залив Посъет «LEVEL» – измерения уровня моря) и мыс Шульца на полуострове Гамова (пункт гравиметрических и GPS наблюдений «GORA»).
Масштаб в километрах

Пример записи уровня моря на пункте Посъет приведен на рис. 5, 6. Эксперимент показывает невысокий уровень морских приливов (до 0,5 метра). Приливный анализ данных уровнемерных наблюдений показал хорошую сходимость результатов с альтиметрическими приливными моделями океана CSR4 и FES02 (таблица). Океанические эффекты можно далее рассчитывать и использовать как поправки в геодезических и геофизических измерениях, например, для геофизической интерпретации материалов, полученных на гравиметрической станции мыс Шульца, расположенной на восточной стороне залива Посъет (см. рис. 4).

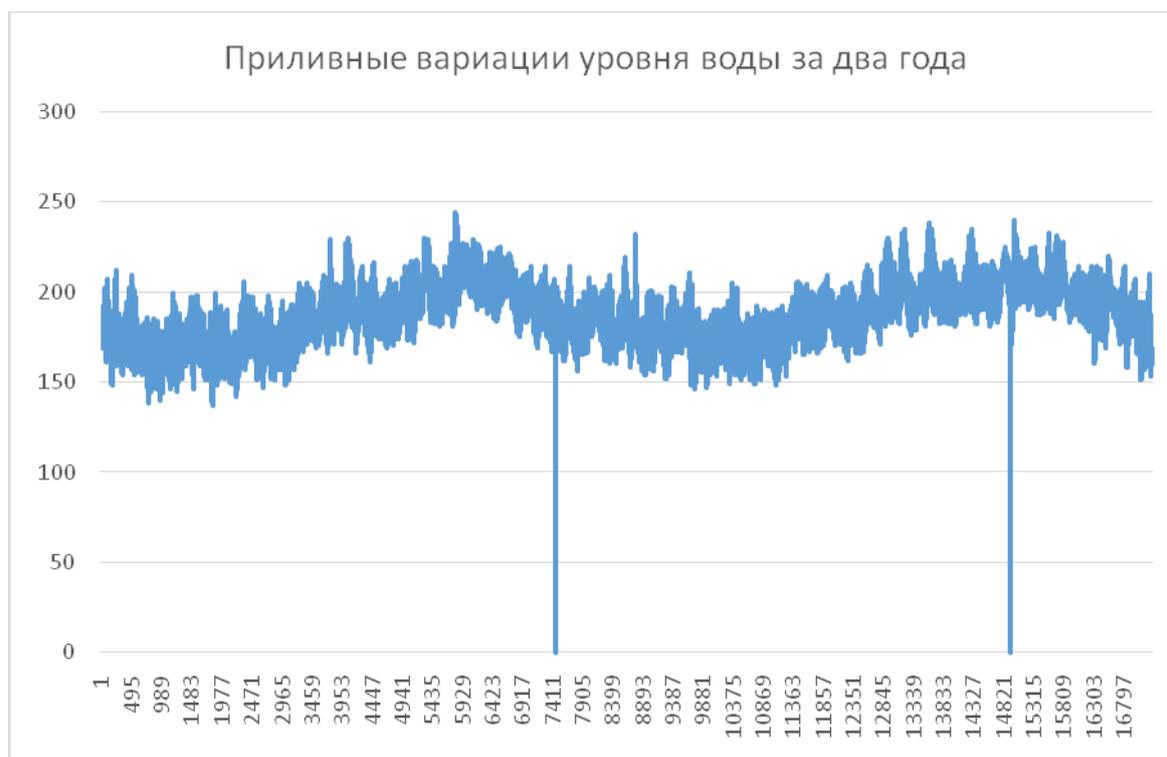


Рис. 5. Запись приливных вариаций на уровнемерной станции Посыет за два года с конца 2012 г. по конец 2014 г. в сантиметрах. Почасовые данные (Служба предупреждения цунами)

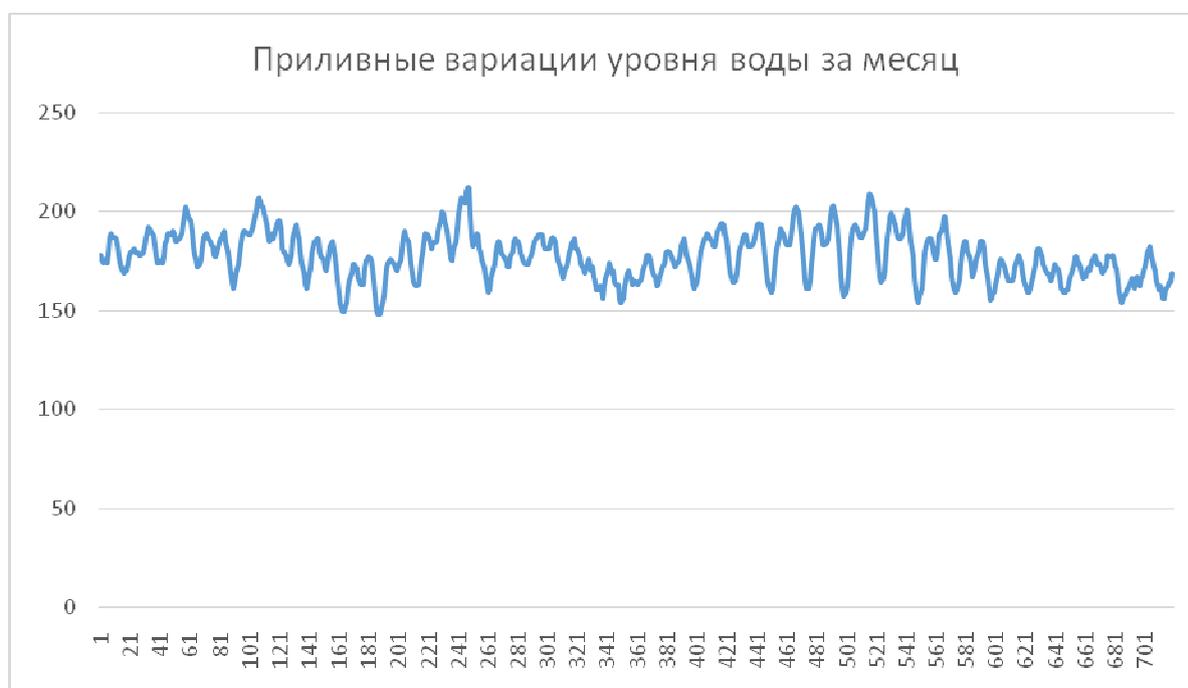


Рис. 6. Запись приливных вариаций на уровнемерной станции Посыет за месяц (декабрь) 2012 года в см. Почасовые данные (Служба предупреждения цунами)

Альтиметрические модели океана CSR4 и FES02 и экспериментальные результаты (уровнемерная станция в заливе Посьета), для суточных (Q1, O1, P1, K1) и полусуточных (N2, M2, S2, K2) приливных волн. Для каждой приливной волны приведены амплитуда волны в сантиметрах и фазовое запаздывание в градусах (океанологическая модель)

Приливная волна				Q1	O1	P1	K1	N2	M2	S2	K2
Результаты анализа экспериментальных данных				1.17 181.0	5.00 198.0	1.78 223.0	5.65 227.0	1.81 181.0	7.70 194.0	3.34 219.0	0.92 209.0
Модель	Широта	Долгота	Площадь								
CSR4											
41895	47.00	131.50	.2260658D+10	1.520 197.	4.280 195.	1.850 222.	6.010 224.	1.210 191.	5.970 184.	2.860 202.	.790 205.
42297	47.50	130.50	.2278969D+10	1.600 203.	4.720 197.	1.810 224.	6.010 226.	0.900 183.	6.240 182.	2.990 202.	.800 205.
42298	47.50	131.00	.2278969D+10	1.560 201.	4.780 196.	1.830 223.	6.010 225.	1.020 187.	6.010 183.	2.940 202.	.800 205.
FES02											
537842	47.00	131.75	.5651670D+09	1.140 164.	4.890 201.	1.790 233.	5.110 232.	2.010 143.	8.620 196.	3.190 202.	.820 198.
536343	47.50	131.00	.5697446D+09	1.110 163.	4.750 199.	1.760 232.	5.010 231.	1.830 142.	7.560 193.	2.780 197.	.720 193.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молоденский М. С. Избранные труды. Гравитационное поле. Фигура и внутреннее строение Земли. – М. : Наука. – 2001. – 570 с.
2. Молоденский С. М. Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. – М. : ИФЗ АН СССР. – 1984. – 215 с.
3. Dehant V., Defraigne P., Wahr J. M. Tides for a convective Earth // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – vol.104. no.B1. January 10. – 1035–1058.
4. Dehant V. Tidal parameters for Earth // *Ph. Earth and Pl. Int.* –1993. – vol. 76. – p. 259–315.
5. Dehant V., Defraigne P. New transfer functions for nutations of a non-rigid Earth // *J. Geophys.Res.* – 1997. – vol. 102. – p. 27, 659–688.
6. Богданов К. Т. Приливы Мирового океана. – М. : Наука, М. 1975. – 116 с.
7. Перцев Б. П. Влияние морских приливов ближних зон на земноприливные наблюдения // *Известия АН СССР, сер. Физика Земли*. – 1976. – № 1. – С. 30–38.
8. Schwiderski E. W. (1980) On charting global ocean tides // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1980. – no. 18. – pp. 243–268.
9. Schwiderski, E. W. Atlas of Ocean Tidal Charts and Maps. // *Marine Geodesy*. – 1983. – v. 6 – n. 3–4. – pp. 219–265.
10. Транс-континентальный приливный профиль / В. Ю. Тимофеев, Б. Дюкарм, М. Ван Раумбеке, П. Ю. Горнов, М. Эвераерт, Е. И. Грибанова, В. А. Паровышний, В. М. Семибаламут, Г. Вепельман, Д. Г. Ардюков // *Физика Земли*. – 2008. – № 5. – С. 42–54.
11. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections / B. Ducarme, V. Yu. Timofeev, M. Everaerts, P. Y. Gornov, V. A. Parovishnii, M. van Ruymbeke // *Journal of Geodynamics*. – 2008. – v. 45. – № 2–3. – pp. 73–82.
12. Вариации приливных параметров и землетрясения / В. Ю. Тимофеев, Т. В. Грибанова, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 271–277.
13. Baker T. F, Bos M. S. Validating Earth and ocean models using tidal gravity measurements. // *Geophys. J. Int.* – 2003. – no. 152. – pp. 468–485.
14. Validation of long-period oceanic tidal models with superconducting gravimeters / J. P. Boy, M. Lubes, R. Ray, J. Hinderer, N. Florsch // *J. of Geodynamics*. – 2006. – no. 41. – pp. 112–118.
15. Eanes R. J., Bettadpur, S. V. The CSR 3.0 Global Ocean Tide Model: Diurnal and Semi-diurnal Ocean Tides from TOPEX/POSEIDON Altimetry – CSR Technical Memorandum 95-06 – Center for Space Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA. – 1995.
16. Egbert G., Bennett A., Foreman M. (1994): TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – no. 99 (C12). – pp. 24821–24852.
17. Matsumoto K., Takanezawa T., Ooe M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data // *J. Oceanography*. – 2000. – no. 56. – pp. 567–581.
18. Combination of temporal gravity variations resulting from Superconducting Gravimeter recordings, GRACE satellite observations and global hydrology models / J. Neumeier, F. Barthelmes, O. Dierks, F. Flechtner, M. Harnisch, G. Harnisch, J. Hinderer, Y. Imanishi, C. Kroner, B. Meurers, S. Petrovic, Ch. Reigber, R. Schmidt, P. Schwintzer, H.-P. Sun, H. Virtanen // *Journal of Geodesy* – 2006. – doi: 10.1007/S00190-005-0014-8.
19. Ray R. D. A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99. – NASA Tech. Mem. 209478, – Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, MD, USA – 1999.

20. Shum C. K., Andersen O. B., Egbert G. Comparison of Newly Available Deep Ocean Tide Models by the TOPEX/POSEIDON Science Working Team // J. Geophys. Res. – 1997. – no. 102 (C11). – pp. 25173–25194.

Получено 11.01.2016

*© В. Ю. Тимофеев, М. Г. Валитов, Б. Дюкарм, Д. Г. Ардюков,
С. Б. Наумов, А. В. Тимофеев, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпацникова,
З. Н. Прошкина, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, 2016*