

УДК 551.24:528.7 (202)

ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ, МОДЕЛИ И ЭФФЕКТ ЖИДКОГО ЯДРА ЗЕМЛИ

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, заведующий 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, заведующий лабораторией, тел. (423)231-14-00, факс (423)231-25-73, 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

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

Сергей Борисович Наумов

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

Изучение отклика Земли на приливную силу дает важную информацию о внутреннем строении Земли, в частности, о ее жидком ядре. При моделировании приливной деформации Земли обычно используется численное решение систем дифференциальных уравнений, которое сравнивается с результатами многолетних высокоточных измерений с помощью специальных программ приливного анализа с учетом различных эффектов. Динамический эффект жидкого ядра традиционно составляет важную часть приливных исследований, в результате наших исследований получена величина сжатия жидкого ядра Земли. В анализе использованы данные, полученные в 2012–2014 гг. с помощью цифрового гравиметра gPhone 111 на станции Мыс Шульца (юг Приморья, побережье Японского моря, ТОИ ДВО РАН).

Ключевые слова: модели приливной деформации Земли, динамический эффект жидкого ядра, приливные вариации силы тяжести, сжатие жидкого ядра.

**TIDAL EFFECTS BY GRAVITY OBSERVATION,
MODELS AND LIQUID CORE EFFECT**

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, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Maxsim G. Valitov

V. Il'ichev Pasific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, 690041, Russia, Vladivostok, 43 Baltiiskai St., Ph. D., Chief of Laboratory, tel. (423)231-14-00, fax (423)231-25-73, 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

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. Il'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

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

Results of tidal investigation used for Earth structure study and Liquid Core study. Tidal deformation modelling was use for numeral solution of differential equations system. Theoretical results compare with experimental data received by tidal program analyses. Dynamic effect of Liquid Core is important part of tidal investigation. Compression of Liquid Core, as the result of our experimental study is the object of our investigation. Tidal analyses were develop with two years series of gravity data. We used gPhone 111 gravimeter data from Shultz Cape station (south Primoria, Coast of Japan Sea, POI FEB RAS).

Key words: dynamic effect of liquid-core, tidal variations of gravity, gravimeters, compression of liquid-core.

Расчет приливных деформаций Земли является известной задачей геодезии [1–7]. Изучение отклика Земли на приливную силу дает важную информацию о внутреннем строении Земли, в частности, о ее жидком ядре. С другой стороны, изменение приливной силы в геологических масштабах времен (десятки и сотни миллионов лет) позволяет строить теории о цикличности процессов на Земле, что имеет самостоятельное значение для развития теории эволюции Земли. Динамический эффект жидкого ядра традиционно составляет важную часть приливных исследований, позволяет получить необходимую информацию об эллиптичности жидкого и твердого ядра Земли.

Известно, что в теории приливной деформации Земли различают статическую приливную реакцию (упругую) и динамическую, в частности, это реакция неупругой Земли – ее мантии и ядра. При интерпретации современных высокоточных данных в области космической геодезии и гравиметрии следует учесть ряд эффектов: учет влияния горизонтальных неоднородностей мантии и коры на амплитуды и фазы земных приливов; учет динамических эффектов в мантии;

уточнение теории динамических эффектов ядра за счет более точного анализа эффектов радиальной неоднородности жидкого ядра (включая эффекты свободной близсуточной нутации твердого внутреннего ядра) [8]. С появлением новых экспериментальных данных в приливном диапазоне следовало, прежде всего, обратить внимание на возможности изучения тех параметров, которые не могут быть определены другими методами. Сюда относятся: горизонтальные неоднородности модулей упругости в мантии в диапазоне частот главных приливных волн; параметры механической добротности мантии в диапазоне периодов от одних суток до 19 лет; вязкость жидкого ядра; величина электромагнитной связи между жидким ядром и мантией; эллиптичность внешнего жидкого ядра и внутреннего твердого ядра.

Остановимся на изучении эффектов жидкого ядра – резонансе в суточном диапазоне приливных волн, отражающемся в результатах приливного анализа высокоточных гравиметрических данных. Далее из анализа получим экспериментальные оценки эллиптичности жидкого ядра.

Эффекты земного ядра оценим по результатам приливных наблюдений на сибирских и дальневосточных станциях. Исследование динамического эффекта жидкого ядра Земли – одна из актуальных задач геофизики и астрономии. В частности, важной проблемой является регистрация резонанса суточного прилива с околосуточной нутацией, обусловленной эффектом жидкого ядра Земли. Известно, что в поле притяжения Луны и Солнца тело Земли испытывает деформации, и один и тот же приливный потенциал порождает как суточные земные приливы, так и явление прецессии-нутации оси вращения Земли. Исследование характера этих деформаций и параметров нутаций помогает уточнить модели внутреннего строения Земли. Так, к настоящему времени от моделей типа «вращающаяся жидкость в упругой оболочке» исследователи перешли к более сложным, учитывающим характер взаимодействия «ядро – мантия», гидродинамические процессы в ядре неэллипсоидальной формы, а также топографию границы «ядро – мантия» [9], уточняемую методами сейсмической томографии [10]. Важность упомянутых выше процессов определяется связью их с такими глобальными явлениями, как возникновение собственного магнитного поля Земли и геотектоникой [11].

Современные методы экспериментальных исследований (интерферометрия на сверхдлинных базах, измерение приливных деформаций) позволяют определить параметры, связанные с динамическим эффектом жидкого ядра, с точностью, достаточной для уточнения и разделения существующих моделей [12–16]. Целью исследований является оценка эффекта жидкого ядра в приливных наблюдениях на сибирских и дальневосточных станциях, сравнение с современными теоретическими моделями явления, получение значения резонансной частоты и оценка сжатия ядра.

Суть исследуемого явления состоит в следующем. Ось вращения Земли по ряду причин совершает сложное движение в пространстве и в теле Земли, которое можно считать состоящим из прецессии, нутации и смещения в теле плане-

ты, которому соответствует период движения полюсов Чандлера – период свободной нутации. Прецессионное движение является следствием несферичности (сжатия) Земли и действия на нее извне пары сил со стороны Луны и Солнца, порождаемых тессеральной составляющей приливного потенциала. В прецессионном движении ось вращения Земли описывает около оси эклиптики конус с раствором $23,5^\circ$. Нутационное движение оси вращения Земли возникает как небольшое колебание (порядка $9''$) около траектории прецессии вследствие непрерывного изменения положения Луны и Солнца относительно земного экватора. В прецессионно-нутационном движении Земля поворачивается вместе с осью мира как одно целое, т. е. ось вращения меняет ориентацию в пространстве. Движение полюсов Земли (и соответственно колебания географических широт) также имеет периодический характер. Основными периодами здесь являются 14-месячный период Чандлера и годовой период, который связывают с сезонными перераспределениями воздушных и водных масс по поверхности Земли. Период Чандлера является следствием сложной реологии Земли. Для модели твердой Земли ему соответствовал бы период Эйлера (305 дней). Реальная упругая Земля подвержена деформациям в гравитационном поле Луны и Солнца, и соответствующие изменения формы Земли и перераспределения масс удлиняют период Эйлера до 14 месяцев. В свободном движении Земля незначительно смещается ($0,14''$ – вариация широты), сохраняя в пространстве ориентацию оси вращения.

Тессеральные приливные силы представляют собой сумму составляющих с околосуточными периодами. Каждой паре таких сил, симметричных по частоте относительно центрального периода (1 звездные сутки), соответствует своя нутация. С удалением от центральной частоты амплитуда нутаций убывает. Процессы, происходящие на и в Земле (возникновение приливного горба и соответствующее перераспределение масс, метеорологические процессы), оказывают влияние на величину амплитуды нутаций. Поэтому экспериментальное отслеживание параметров свободной нутаций жидкого ядра – один из путей уточнения моделей строения Земли. Одно из возмущений прецессионно-нутационного движения оси вращения Земли связано с колебаниями жидкого ядра относительно оболочки, так как оно также подвержено действию тессеральных приливов. Согласно гидродинамической теории вращения жидкого ядра, следует ожидать резонанса его околосуточных колебаний (иначе называемых суточной нутацией) с суточным земным приливом. Наблюдения земных приливов подтверждают это предположение. Так, по результатам гравиметрических и наклономерных наблюдений отмечается частотная зависимость амплитуд приливных волн, в частности, наличие систематической разности между амплитудными факторами главных суточных волн (амплитудный фактор – наблюдаемая амплитуда, нормированная к ее теоретическому значению). Соответственно эффект резонанса присутствует и в определяемых из амплитудных факторов числах Лява h , k , l . Приливная теория дает соотношение между числами Лява, частотой прилива и частотой нутации, обусловленной колебаниями

жидкого ядра Земли [1]. Поэтому, используя данные приливных наблюдений (а именно, числа Лява) и опираясь на хорошо известный из астрономии спектральный состав прилива, можно уточнить частоту нутации и величину соответствующего периода. Остановимся на постановке этой задачи подробнее.

Впервые динамический эффект жидкого ядра для моделей Земли, соответствующих сейсмологическим данным, рассмотрен в работах [1, 16]. В моделях принято распределение плотностей по Буллену, Земля имеет жидкое ядро со сжатием $\varepsilon = 0,0026 = 1/384,6$ (МІ) или жидкое ядро с твердым внутренним ядром (МІІ). Величина эффекта жидкого ядра вследствие резонанса в числах Лява, согласно теории Молоденского для модели с жидким ядром, определяется вторыми членами соотношений:

$$\begin{aligned} h &= 0,6206 + 0,4711 \cdot 10^{-3} \frac{\sigma(\sigma + 2\omega)}{\omega^2} \beta; \\ k &= 0,3070 + 0,2384 \cdot 10^{-3} \frac{\sigma(\sigma + 2\omega)}{\omega^2} \beta; \\ l &= 0,0904 - 0,0112 \cdot 10^{-3} \frac{\sigma(\sigma + 2\omega)}{\omega^2} \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ – частота приливной волны; ω — частота суточного вращения Земли; $\beta = 41,87 / (0,2136 - 100 \cdot ((\sigma_0 + \omega) / \omega)) + 1,9$ – резонансный фактор; σ_0 – резонансная частота (частота свободной нутации ядра). Для наиболее сильных суточных приливных волн O_1 и K_1 значение β соответственно равно: +197,9 и +7,1. Резонансная частота для модели МІ равна 1,0021405 цикла в звездные сутки (ц/зв. сут.), что соответствует часовой скорости 15,073264 град/ч. Для модели МІІ соотношения более сложные [1, 2], а частота составляет 1,0021628 ц/зв. сут. (15,0736 град/ч). Теоретические значения чисел Лява для моделей МІ и МІІ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теоретические значения чисел Лява для моделей МІ и МІІ

| Модель | h_{O_1} | h_{K_1} | k_{O_1} | k_{K_1} | l_{O_1} | l_{K_1} |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| МІ | 0,617 | 0,527 | 0,305 | 0,260 | 0,0905 | 0,0926 |
| МІІ | 0,617 | 0,534 | 0,300 | 0,261 | 0,0809 | 0,0838 |

Рассмотрим далее, как проявляется резонансный эффект при приливных наблюдениях различных видов: в вариациях силы тяжести, наклонах и линейных деформациях в разных азимутах. Как было сказано выше, эффект жидкого ядра проявляется в амплитудах главных суточных волн O_1 и K_1 . Резонансный фактор у них отличается на два порядка, что дает возможность определить ди-

намический эффект жидкого ядра по разности амплитудных факторов этих волн. Другим способом представления динамического эффекта является отношение амплитудных факторов. Так, для гравиметрических приливных наблюдений искомым параметром является $\delta_{K_1}/\delta_{O_1}$. При таком представлении исключается масштабный коэффициент, погрешности определения которого могут существенно понизить точность. Далее используем именно отношение амплитудных факторов волн K_1 и O_1 .

Эффект жидкого ядра, согласно теоретическим представлениям, достигает: 2 % в приливных вариациях силы тяжести, 6 % в приливных вариациях наклонов земной поверхности, 19–39 % в приливных деформациях в зависимости от азимута. Величина эффекта различна на разных частотах. Отражение динамического эффекта жидкого ядра в различных видах приливных наблюдений по теории Молоденского приведено в табл. 2.

Таблица 2

Динамический эффект жидкого ядра в различных видах приливных наблюдений по теории Молоденского

| Вид наблюдений | A_H/A_T в числах Лява | Величина A_H/A_T для волн | | | | Разность для волн O_1 и K_1 | | Отношение ампл. факторов для волн O_1 и K_1 | | Эффект в процентах | |
|---|---------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------------------------------|----------|---|---------|--------------------|-------|
| | | O_1 | | K_1 | | MI | MII | MI | MII | MI | MII |
| | | MI | MII | MI | MII | | | | | | |
| Приливные вариации силы тяжести | $\delta = 1 + h - \frac{3}{2}k$ | 1,1 590 | 1,1 640 | 1,1 375 | 1,1 435 | 0,0 215 | +0,0 205 | 0,9 814 | 0,9 823 | 1,86 | 1,77 |
| Приливные наклоны | $\gamma = 1 - h + k$ | 0,688 | 0,686 | 0,731 | 0,727 | -0,043 | -0,041 | 1,0625 | 1,0597 | 6,25 | 5,97 |
| Приливные деформации а) азимут С-Ю б) В-3 | $L = h - 4l$ | 0,2 550 | 0,2 904 | 0,1 568 | 0,1 988 | 0,0 982 | +0,0 916 | 0,6 149 | 0,6 846 | 38,51 | 31,54 |
| | $L = h - 2l$ | 0,4 360 | 0,4 522 | 0,3 419 | 0,3 664 | 0,094 1 | +0,085 8 | 0,784 2 | 0,810 3 | 21,58 | 18,97 |

Примечание. A_H – наблюдения, A_T – теоретическая амплитуда.

В последние годы повысилась точность экспериментальных работ, появились более сложные модели строения Земли. Была создана модель, в которой рассматривается эллипсоидальная вращающаяся Земля с упругим внутренним ядром, жидким внешним ядром и упругой мантией [3, 4, 5, 6, 15]. Реологические пара-

метры соответствуют моделям 1066А, PREM-C и С2. Гидростатическое сжатие ядра $\varepsilon = 1/392$, резонансная частота 1,002 173 9 ц/зв.сут. (15,073 767 град/ч). Соотношения для чисел Лява, согласно Вару (в его обозначениях), имеют вид:

$$\begin{aligned}
 k_0(\omega_n) &= k_0(\omega_{O_1}) + k_l \frac{\omega_n - \omega_{O_1}}{\omega_l - \omega_n}; \\
 h_0(\omega_n) &= h_0(\omega_{O_1}) + h_l \frac{\omega_n - \omega_{O_1}}{\omega_l - \omega_n}; \\
 l_0(\omega_n) &= l_0(\omega_{O_1}) + l_l \frac{\omega_n - \omega_{O_1}}{\omega_l - \omega_n},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где ω_n – приливная частота; $\omega_{O_1} = 0,927\ 0$, $\omega_{K_1} = 0,994\ 5$, $\omega_{K_1} = 1$ ц/зв. сут.; ω_l – резонансная частота (частота свободной нутации); значения коэффициентов для различных моделей строения Земли показаны в табл. 3. Значения чисел Лява для теоретических моделей Вара и Молоденского приведены в табл. 4.

Таблица 3

Значение чисел Лява для моделей строения Земли 1066А, PREM-C и С2

| Модель | $k_0(\omega_{O_1})$ | k_l | $h_0(\omega_{O_1})$ | h_l | $l_0(\omega_{O_1})$ | l_l |
|--------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-------------|
| 1066А | 0,298 | -0,001 23 | 0,603 | -0,002 46 | 0,084 2 | 0,000 078 1 |
| РЕМ-С | 0,298 | -0,001 24 | 0,602 | -0,002 46 | 0,083 9 | 0,000 076 9 |
| С2 | 0,298 | -0,001 23 | 0,602 | -0,002 45 | 0,084 6 | 0,000 075 8 |

Таблица 4

Числа Лява k , h и l для приливных волн O_1 и K_1 , согласно теоретическим расчетам Молоденского и Вара

| Параметр | | 1066А | РЕМ-С | С2 | МI | МII |
|----------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Частота | град/ч | 15,073 728 | 15,073 813 | 15,073 923 | 15,073 263 | 15,073 610 |
| k | O_1 | 0,298 (1,000) | 0,298 (1,000) | 0,298 (1,000) | 0,305 (1,000) | 0,300 (1,000) |
| | K_1 | 0,256 (0,859) | 0,256 (0,859) | 0,257 (0,862) | 0,260 (0,862) | 0,261 (0,870) |
| h | O_1 | 0,603 (1,000) | 0,602 (1,000) | 0,602 (1,000) | 0,617 (1,000) | 0,614 (1,000) |
| | K_1 | 0,520 (0,862) | 0,519 (0,862) | 0,512 (0,865) | 0,527 (0,854) | 0,534 (0,871) |
| l | O_1 | 0,084 2 (1,000) | 0,083 9 (1,000) | 0,084 6 (1,000) | 0,090 5 (1,000) | 0,080 9 (1,000) |
| | K_1 | 0,086 9 (1,032) | 0,086 5 (1,031) | 0,087 2 (1,031) | 0,092 6 (1,023) | 0,083 8 (1,036) |

Как видим, величины эффекта в различных видах приливных измерений близки, так как числа Лява в различных моделях сходны.

Определение эффекта жидкого ядра проводилось по различным видам измерений, выполненным за многие годы. Использовались результаты измерений на сибирских станциях и станциях Дальнего Востока.

Гравиметрические измерения в Новосибирске представлены результатами, полученными в отдельные периоды (1966–1989 гг.) гравиметром Аскания GS-12 № 186 [17, 18]. Как отмечалось выше, для исключения влияния ошибок, определения масштаба записи прибора, для анализа использовалось отношение амплитудных факторов двух наиболее значимых по амплитуде суточных приливных волн O_1 и K_1 одна вне, а другая в зоне влияния резонанса суточного прилива с близосуточной частотой свободной нутации. Это отношение для новосибирской станции равно 0,982 5. Для этой же станции анализируются результаты измерений в 1977–1979 гг. группой из четырех гравиметров [17, 18]: Аскания GS-11 № 159, GS-12 № 180 и № 186, СКГ. По данным этих измерений, отношение для волн O_1 и K_1 равно 0,983 1.

Использование отношения амплитудных факторов двух волн позволяет, кроме исключения ошибки определения масштаба записи, уменьшить влияние метеовоздействий на результаты измерений. Говоря о влиянии океанических приливов на результаты измерений, следует заметить, что для внутриконтинентальных станций, удаленных на тысячи километров от океанов, поправки составляют десятые доли микрогала и сходны для волн, близких по спектру.

В 1996–1997 гг. в подвале сейсмостанции Талая (Байкальский регион) на гравиметрическом пункте (номер приливного пункта в международной классификации 1301, координаты 51.68°N, 103.65°E) выполнены работы с приливным цифровым гравиметром ЛаКоста Ромберга G402. Из приливного анализа получена величина соотношения: $\delta_{K_1}/\delta_{O_1} = 0,982\ 4 \pm 0,008\ 9$ [19, 20]. Полученные результаты приливного анализа, используя известные соотношения для чисел Лява и вышеприведенные формулы Вара, можно пересчитать в частоту свободной нутации ядра. Результаты пересчета для различных периодов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значение частоты (ω_1) и часовой скорости (f_0) по различным видам приливных измерений на сибирских станциях (цикл в звездные сутки и градус в час)

| № п/п | Тип прибора, период, станция, программа | ω_1 , цикл/зв. сут. | f_0 , градус/ч |
|-------|---|-------------------------------|---------------------|
| 1 | Гравиметр GS-12 № 186, 1966–1989 гг., Новосибирск | 1,002 18 | 15.073 8 |
| 2 | Гравиметры GS-11 № 159, GS-12 № 180 и № 186, СКГ, 1977–1979 гг., ETERNA 3.0, Новосибирск | 1,002 26 | 15,075 1 |
| 3 | Цифровой гравиметр LCR G-402, Талая, 1996–1997 гг. Venedikov-Ducarme, 320 дней с учетом атм. давления | 1,002 25 | 15,074 8 |

Для получения экспериментального значения частоты используется отношение амплитудных факторов волн O_1 и K_1 либо других волн из суточного спектра, и резонансное соотношение (2).

Более точные измерения с современным гравиметром ЛаКоста Ромберга (gPhone 111, полигон Мыс Шульца, ТОИ ДВО РАН, полуостров Гамова, юг Приморья, координаты 42.58°N, 131.16°E,) выполнены в 2012–2014 гг. Результаты приливного анализа в суточном диапазоне приведены в табл. 6. Результаты анализа для станции Мыс Шульца (номер станции в международной приливной системе № 1406) дают отношения $\delta_{K_1}/\delta_{O_1} = 0,982 2 \pm 0,001 0$. Данные по станции мыс Шульца и кривая резонанса с частотой жидкого ядра Земли приведены на рисунке.

Таблица 6

Результаты приливного анализа гравиметрических данных.

Диапазон суточных волн. Период наблюдений с 22.06 2012 г. по 26.12 2014 г. всего принято для анализа 860 суток. Анализ выполнялся по программе ANALYZE, 3.40 с потенциалом из 1 200 волн. Использована неупругая приливная модель Земли (WAHR-DEHANT-ZSCHAU) [4–6, 15]

| Диапазон | | Индекс волны | Амплитуда нм/с ² | Амплитудный фактор | Ошибка | Фазовый сдвиг | С ошибкой |
|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------------|----------|---------------|-----------|
| от цикл/день | до цикл/день | | | | | | |
| 0,501 370 | 0,842 147 | SGQ1 | 2,285 7 | 1,125 46 | 0,088 21 | -5,287 0 | 4,497 8 |
| 0,842 148 | 0,860 293 | 2Q1 | 7,839 4 | 1,220 93 | 0,026 92 | -0,474 9 | 1,263 9 |
| 0,860 294 | 0,878 675 | SGM1 | 9,461 9 | 1,148 86 | 0,021 24 | 0,794 1 | 1,058 0 |
| 0,878 676 | 0,896 968 | Q1 | 59,248 0 | 1,160 72 | 0,003 36 | -0,062 2 | 0,165 5 |
| 0,896 969 | 0,911 390 | RO1 | 11,254 0 | 1,147 40 | 0,016 33 | -0,562 6 | 0,813 7 |
| 0,911 391 | 0,931 206 | O1 | 309,450 1 | 1,164 01 | 0,000 61 | 0,155 0 | 0,030 1 |
| 0,931 207 | 0,947 991 | TAU1 | 4,036 1 | 1,212 76 | 0,033 10 | -2,836 9 | 1,563 2 |
| 0,947 992 | 0,967 660 | NO1 | 24,337 2 | 1,170 09 | 0,007 03 | 0,250 8 | 0,344 8 |
| 0,967 661 | 0,981 854 | CHI1 | 4,654 5 | 1,166 46 | 0,040 60 | 2,231 6 | 1,994 0 |
| 0,981 855 | 0,996 055 | PI1 | 8,417 0 | 1,141 46 | 0,019 43 | 1,927 3 | 0,977 8 |
| 0,996 056 | 0,998 631 | P1 | 143,986 4 | 1,154 50 | 0,001 15 | -0,130 2 | 0,056 3 |
| 0,998 632 | 1,001 369 | S1 | 3,403 1 | 1,298 29 | 0,069 45 | 8,153 9 | 3,441 9 |
| 1,001 370 | 1,004 107 | K1 | 435,210 4 | 1,143 32 | 0,000 41 | 0,039 9 | 0,020 8 |
| 1,004 108 | 1,006 845 | PSI1 | 3,403 3 | 1,240 99 | 0,048 70 | 3,162 1 | 2,261 6 |
| 1,006 846 | 1,023 622 | PHI1 | 6,196 2 | 1,158 86 | 0,026 60 | 2,763 6 | 1,318 3 |
| 1,023 623 | 1,035 379 | TET1 | 4,653 8 | 1,216 21 | 0,038 99 | -0,419 8 | 1,835 8 |
| 1,035 380 | 1,057 485 | J1 | 24,336 5 | 1,162 49 | 0,008 12 | -0,139 7 | 0,400 5 |
| 1,057 486 | 1,071 833 | SO1 | 4,036 8 | 1,202 68 | 0,050 42 | -1,388 1 | 2,403 0 |
| 1,071 834 | 1,090 052 | OO1 | 13,313 7 | 1,107 02 | 0,022 07 | -0,553 6 | 1,142 5 |
| 1,090 053 | 1,470 243 | NU1 | 2,549 1 | 1,104 94 | 0,111 28 | -3,126 4 | 5,767 8 |

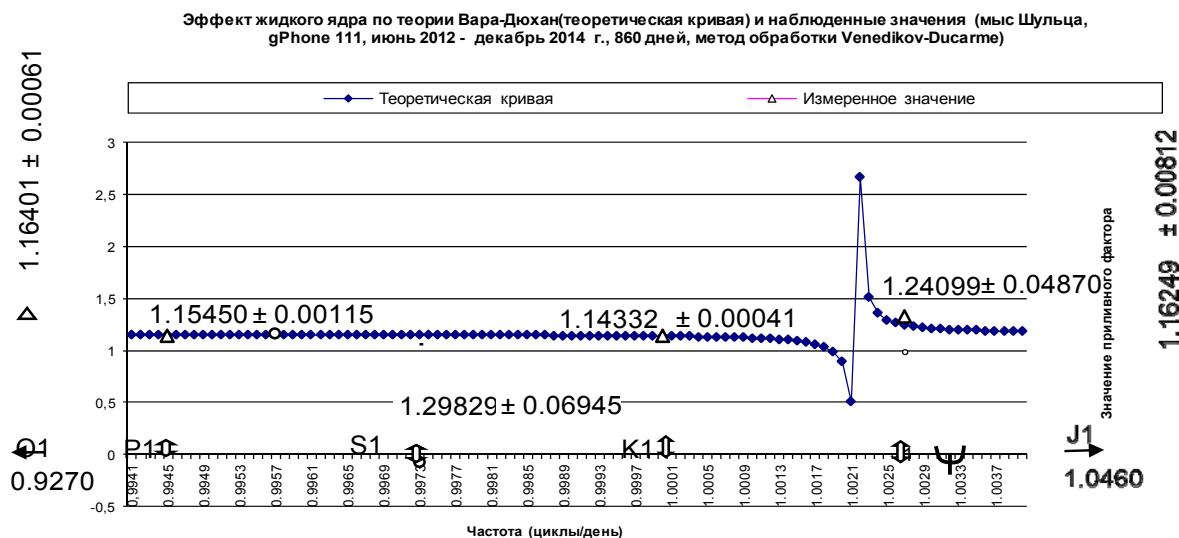


Рис. Эффект жидкого ядра, определения частоты резонанса – теория и эксперимент

По результатам анализа, приведенным на рисунке, получено значение угловой скорости для жидкого ядра $15,074 \text{ } ^\circ/\text{час}$ (по теории WD $15,073 \text{ } ^\circ/\text{час}$). Известно соотношение [18–20], связывающее частоту резонанса со сжатием ядра:

$$\omega_1 = 1 + (\varepsilon_{\text{я}} - \beta_{\text{м}}) \cdot A/A_{\text{м}}, \quad (3)$$

где ω_1 в цикл/звездные сутки; A и $A_{\text{м}}$ – главные моменты инерции Земли и мантии ($8,37 \times 10^{37} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ и $7,44 \times 10^{37} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$); $\varepsilon_{\text{я}}$ – сжатие ядра по W-D (1/393); $\beta_{\text{м}}$ – коэффициент, отражающий неупругие свойства мантии по модели W-D [4]; $\beta_{\text{м}} \cong 0,25 \cdot \varepsilon_{\text{я}}$.

Таким образом, результаты приливного анализа показывают увеличение сжатия по сравнению с равновесным состоянием (1/392,46), что говорит об увеличении силового взаимодействия «ядро – мантия». Значение частоты резонанса (1,002 23 ц.зв. /сут. = $1 + 1/450$) по данным последнего эксперимента (см. рисунок, табл. 6) дает величину сжатия ядра 1/380.

Выводы. В работе рассматриваются экспериментальные данные по гравиметрической станции Мыс Шульца. В результате анализа с использованием теории Молоденского и Вара-Дюхан получены оценки параметров жидкого ядра Земли. Значение сжатия жидкого ядра $\alpha_{\text{ж-я}} = 1/380 = (2,631 \pm 0,002) \cdot 10^{-3}$ значительно превышает величину $\alpha_{\text{ж-я-теор}} = (2,56) \cdot 10^{-3}$, предсказываемую теорией гидростатического равновесия реальной Земли. Столь большое различие можно объяснить тем, что время релаксации сдвиговых напряжений в нижней мантии – порядка 100 млн. лет, тогда как для верхней мантии это время значительно меньше. При таком соотношении параметров граница «ядро – мантия» «за-

поминает» ту фигуру равновесия, которая имела место 100 млн. лет назад (когда Земля вращалась быстрее), тогда как сжатие всей Земли примерно соответствует фигуре равновесия в современную эпоху. С. М. Молоденский на основе этой гипотезы построил модели распределения вязкости в нижней мантии [21], которые оказались в хорошем соответствии с моделями В. П. Трубицина, построенными по данным о крупномасштабной конвекции мантии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Molodenskii M. S. The Theory of Nutations and Diurnal Earth Tides // IV Symp. Int. sur. les Marees Terrestres. O. R. Belg. Comm. – 1961. – Nr 188, S. Geoph. – 58. – 25–56.
2. Молоденский М. С. Избранные труды. Гравитационное поле. Фигура и внутреннее строение Земли. – М. : Наука. – 2001. – 570 с.
3. Молоденский С. М. Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. – М. : ИФЗ АН СССР. – 1984. – 215 с.
4. 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.
5. Dehant V. Tidal parameters for Earth // Physics of the Earth and Planetary Interior. – 1993. – vol. 76. – p. 259–315.
6. Dehant V., Defraigne P. New transfer functions for nutations of a non-rigid Earth // J. Geophys.Res. – 1997. – vol. 102. – p. 27,659–27,688.
7. Dziewonski A. D. and Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet Inter. – 1981– vol.25. – 297–356.
8. Косейсмические эффекты на континентальной окраине (космическая геодезия и гравиметрия) / В. Ю. Тимофеев, Е. Н. Калиш, М. Г. Валитов, Ю. Ф. Стусь, Р. Г. Кулинич, Д. Г. Ардюков, П. Ю. Горнов, А. В. Тимофеев, Д. А. Носов, И. С. Сизиков // 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. 264–271.
9. Aspherical structure of the mantle, tectonic plate motions, nonhydrostatic geoid, and topography of the core-mantle boundary / A. M. Forte, W. R. Paltier, A. M. Dziewonski, R. L. Woodward // Dynamics of the Earth's Deep Interior and Earth Rotation, Geophys. Monogr. Ser., – vol.72, edited by J.-L. Le Mouel, D.E. Smylie and T.Herring. – AGU, Washington, D.C. – 1993. – pp. 135–166.
10. Jacobs J. A. The inner core and the geodynamo: determining their roles in the Earth history // EOS. – 1995. – v.76. – n. 25–249.
11. Gwinn C. R., Herring T. A., Shapiro I. I. Geodesy by radio interferometry: Studies of the forced nutations of the Earth, 2, Interpretation // J. Geophys. Res. – 1986. – v. 91. – pp. 4755–4765.
12. Herring T. A., Gwinn C. R. and Shapiro I. I. Geodesy by Radio Interferometry: Studies of the Forced Nutations of the Earth. I. Data Analysis; II. Interpretation // J. Geoph. Res. – 1986. – 91, B5. – 4745–4765.
13. Melchior P. Tidal interactions in the Earth Moon system // Chronique U.G.G.I. – N 210, Mars/Avril. – MHN, Luxembourg,. – 1992. – p.76–114.
14. Neuberg J., Hinderer J., Zurn W. Stacking gravity tide observations in central Europe for the retrieval of the complex eigenfrequency of the nearly diurnal free wobble // Geophys. J.R.Astron. Soc. – 1987. – 91. – 853–868.
15. Wahr J. M. Effect of the fluid core; A normal mode expansion for the forced response of rotating Earth, Body tides // Geophys. J. R. Astron. Soc. – 1981. – vol.64. – 3. – 635–765.

16. Jeffreys, H., Dynamic effects of a liquid core. // Monthly Not.R.Astr.Soc. – 1949. – 109. – nr. 6. – 670-687 and 1950. – 110. – nr. 5. – 460-466.

17. Сарычева Ю. К., Тимофеев В. Ю. Приливные параметры Земли по результатам новосибирских гравиметрических наблюдений // Геология и геофизика. – 1992.– № 2. – С. 37–44.

18. Приливные изменения силы тяжести в Новосибирске в 1977–1979 гг. / В. Г. Баленко, С. Н. Барсенков, В. Г. Булацен, Д. Г. Гриднев, И. А. Дычко, Ю. К. Сарычева, В. Ю. Тимофеев // Медленные деформации Земли и ее вращение. – М. : Радио и связь, 1985. – С. 40–59.

19. Трансконтинентальный приливный профиль: Атлантическое побережье Европы – Юг Сибири – Тихоокеанское побережье России / В. Ю. Тимофеев, Б. Дюкарм, М. Ван Раумбеке, П. Ю. Горнов, М. Эвераерт, Е. И. Грибанова, В. А. Паровышний, В. М. Семибаламут, Г. Веспельман, Д. Г. Ардюков / Физика Земли. – 2008. – № 5. – С. 42–54.

20. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections / В. Ducarme, V. Yu. Timofeev, M. Everaerts, P. Y. Gornov, V. A. Parovishnii, M. van Ruymbeke // Journal of Geodynamics. – v. 45. – N. 2–3. – 2008. – pp. 73–82.

21. Молоденский С. М. Приливы, нутация и внутреннее строение Земли // Гравиметрия и геодезия. – М. : Научный мир. ИФЗ-ЦНИИГАиК, 2010. – С. 64–72.

Получено 25.03.2016

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