

УДК 528.546

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛИННОБАЗИСНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НИВЕЛИРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ (ПЛАНЕТАРНЫХ) ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

© 2015 г. А.Б. Манукин, О.С. Казанцева, И.И. Калинин,  
С.В. Бехтерев, В.И. Ребров

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Статья посвящена новым возможностям использования гидростатического нивелира, которые открываются при существенном увеличении линейной базы прибора. Выясняется, что кроме классических задач измерения наклонов и деформаций участков земной поверхности гидростатические нивелиры с базой в несколько километров можно использовать для получения информации регионального и глобального характера. Подробно рассмотрены три задачи, решение которых становится возможным благодаря новой конструкции прибора: измерение неравномерности вращения Земли внутри суток; измерение возможных малых крутильных подвижек отдельных блоков литосферы; измерение малых трансляционных колебаний внутреннего ядра Земли на периодах в несколько часов. Основное внимание при этом уделяется анализу потенциальных возможностей прибора.

Показано, что неравномерность угловой скорости вращения Земли может быть измерена с относительной точностью  $\Delta\omega/\omega=5\cdot 10^{-10}-5\cdot 10^{-11}$  за  $1\cdot 10^3$  с и  $\Delta\omega/\omega=5\cdot 10^{-9}-5\cdot 10^{-10}$  за  $1\cdot 10^4$  с. Точность измерения горизонтальных крутильных подвижек блоков литосферы на периодах  $1\cdot 10^5$  с (около суток) может составить  $10^{-4}$  м, а амплитуда трансляционных колебаний внутреннего ядра Земли – несколько сантиметров. Уникальность инструмента открывает качественно новую область его применения и новый канал получения информации о Земле.

**Ключевые слова:** длиннобазисный гидростатический нивелир, метод измерения, динамический диапазон, глобальные геофизические исследования, неравномерность вращения Земли, блоки литосферы, трансляционные колебания ядра.

### Введение

Современные гипотезы, связанные с исследованием строения, движения, особенностей состава земной коры и процессов, происходящих в глубинах планеты, требуют разработки и создания принципиально новых высокоточных датчиков геофизической информации.

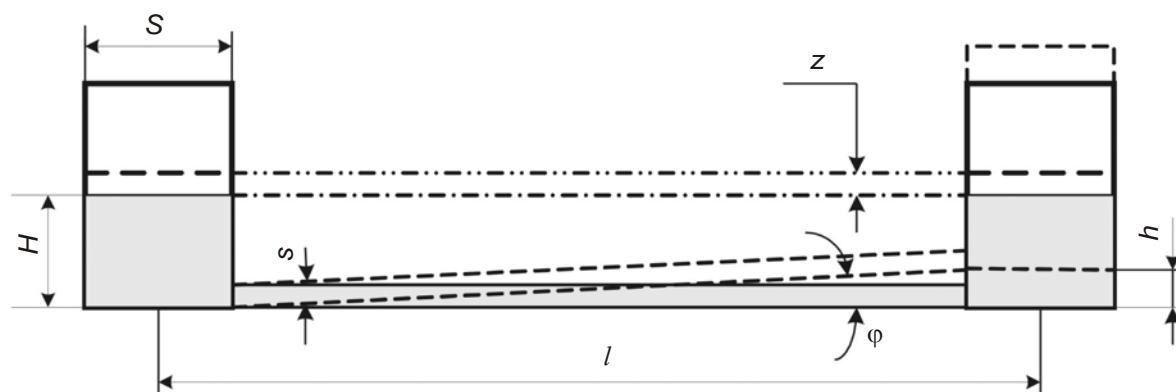
В Институте физики Земли был разработан гидростатический нивелир, предназначенный для непрерывных измерений вариаций вертикальных относительных смещений точек, разнесенных по земной поверхности (сооружения), с предельным разрешением  $5\cdot 10^{-3}$  мкм [Гусев, Манукин, 1982; Манукин, Ребров, 1996]. Измерительная база прибора определялась рядом технических особенностей, амплитудой неустранимых земноприливных движений и не могла превышать 300 м, ограничивая тем самым круг решаемых задач.

Применение длиннобазисного гидростатического нивелира (ДГН) не исчерпывается традиционными измерениями наклонов всей базы прибора и вариаций относи-

тельных вертикальных движений концевых сосудов, обусловленных в основном приливными процессами и деформационными явлениями. С помощью этого уникального прибора можно получать данные о процессах регионального и глобального характера, измерять параметры, характеризующие поведение Земли как планеты в целом. Так, может быть изучена неравномерность вращения Земли внутри суток, выявлены крутильные движения отдельных блоков литосферы, трансляционные колебания внутреннего (твердого) ядра. Авторы уверены, что это далеко не полный перечень эффектов, которые могут быть измерены с помощью ДГН. Оценкам новых, порой неожиданных, возможностей, открывающихся при использовании ДГН с базой 1 км и более, посвящена данная работа.

### Использованные данные и методы исследований

Принцип работы гидростатического нивелира прост – это известный принцип сообщающихся сосудов (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема гидростатического нивелира

$l$  – длина базы прибора;  $S$  – площадь сечения концевых измерительных сосудов;  $s$  – площадь сечения соединительной трубки;  $H$  – начальный уровень жидкости в сосудах;  $h$  – вертикальное перемещение измерительного сосуда;  $\varphi$  – угол наклона базы прибора;  $z$  – изменение уровня жидкости в сосуде

Важнейшая особенность гидростатического нивелира, обеспечивающая потенциально высокую долговременную стабильность прибора, – отсутствие в нем элементов, постоянно пребывающих в высоконапряженном (или сильно искусственно активированном) состоянии, неизбежно приводящем к ползучести и долговременной нестабильности.

Многолетние наблюдения в штольнях г. Обнинска доказали надежность и стабильность характеристик датчика за длительный период [Гусев и др., 1988]. Высокая чувствительность прибора позволила выявить не только вариации наклонов исследуемых участков, но и наличие сдвиговых деформаций и разломов внутри базы прибора, подтвердив тем самым высокую информативность проводимых наблюдений.

В статье рассматриваются новые возможности ДГН, принцип работы которого аналогичен описанному выше. Однако новая конструкция [Манукин и др., 2013] позволяет значительно (в десятки раз) увеличить базу измерений за счет расширения динамического диапазона датчика перемещений поверхности жидкости. Это открывает новые возможности для исследования целого ряда процессов, ранее недоступных для

анализа, среди которых различные локальные геофизические процессы, происходящие, например, на гидротехнических объектах; движения отдельных блоков земной коры; дифференциальные движения в протяженных разломных зонах; сейсмогравитационные движения и “тихие землетрясения”; геофизические процессы, характеризующие вариации глобальных параметров Земли в целом.

Действительно, если длина базы ДГН  $l=3$  км, то в квазистатическом режиме её наклон на  $1''$  ( $5 \cdot 10^{-6}$  рад) приведет к относительному изменению уровня жидкости в сосудах примерно на 1.5 см. Это значение меньше инструментальной ошибки современной спутниковой альтиметрии, но близко к ней. С другой стороны, амплитуда приливных наклонов составляет  $\sim 0.02''$ , соответствуя относительному изменению уровня жидкости в сосудах на 0.3 мм, а радиотехнические методы измерения малых механических перемещений позволяют фиксировать вариации уровня жидкости в концевых сосудах с разрешением  $10^{-7}$  см ( $10^{-3}$  мкм). Поэтому представляются возможными непрерывные наблюдения за вариациями вертикальных относительных движений фундаментов, разнесенных на 3 км, с разрешением 1 мкм. Формально, отвлекаясь от проблем контакта прибора с фундаментом, можно говорить о перспективе обнаружения движений с амплитудами на 2–3 порядка меньше. Всё определяется влиянием вариаций ряда параметров, например, опорной частоты радиотехнического устройства, атмосферного давления, температуры и её градиента, а также влиянием перераспределения тяготеющих масс и сейсмических воздействий. Поэтому, прежде чем оценить отклик прибора на глобальные геофизические процессы, рассмотрим отдельно влияние наиболее сильных внешних факторов, частично повторив оценки, приводимые в [Манукин и др., 2013].

### **Влияние внешних факторов на работу длиннобазисного гидростатического нивелира**

*Влияние вариаций атмосферного давления.* В качестве жидкости для гидростатических нивелиров чаще всего используется масло с низкой температурой замерзания и хорошими диэлектрическими характеристиками – высоким значением пробивного напряжения, малым тангенсом угла диэлектрических потерь и т.д.

Изменение уровня  $z$  (см. рис. 1) в каждом измерительном сосуде при изменении атмосферного давления на величину  $\Delta P$  определяется как

$$z = (s/2S)l\chi\Delta P,$$

где  $\chi \approx 6 \cdot 10^{-5}$  1/бар – коэффициент сжимаемости диэлектрических масел (конденсаторного, трансформаторного, полиметилсилоксановых). Если  $S/s=25$ ,  $l=3 \cdot 10^3$  м,  $\Delta P=1$  мм рт. ст., то уровень жидкости в сосуде изменится примерно на  $5 \cdot 10^{-3}$  мм.

Надо заметить, что на эту величину изменится уровень сразу в обоих сосудах, так что сжимаемость жидкости не приведет к относительному изменению её уровней, т.е. к кажущемуся относительному вертикальному перемещению измерительных сосудов.

*Влияние температурного расширения диэлектрического масла и соединительной трубки.* Если  $\beta_{ж}$  – коэффициент объемного расширения масла,  $\beta_{т}$  – коэффициент линейного расширения материала соединительной трубки,  $\Delta T$  – изменение температуры, то величина  $z$  в каждом сосуде вычисляется по формуле

$$z \approx \left( \frac{s}{2S} \right) l (\beta_{ж} - 3\beta_{т}) \Delta T .$$

Если  $\beta_{ж} \sim 6 \cdot 10^{-4}$  1/К,  $\beta_{т} \sim 6 \cdot 10^{-4}$  1/К (для резиновой трубки),  $l = 3 \cdot 10^3$  м, то при  $\Delta T = 1$  °С изменение уровня в сосудах составит  $\approx 72$  мм.

Изменение температуры, так же как и изменение давления, не приводит к кажущимся вертикальным подвижкам сосудов, но требует обеспечения значительного динамического диапазона датчиков перемещений жидкости. Так, при изменении температуры на 20 °С уровень жидкости в измерительных сосудах при выбранных параметрах изменится примерно на 1.4 м (!). Уменьшить влияние температуры на изменение уровня жидкости можно, врезав в соединительную трубку ёмкость большого диаметра. Тогда, к примеру, при радиусе этой ёмкости 50 см и радиусе соединительной трубки 1 см изменение температуры на 1 °С приведет к изменению уровня жидкости в измерительных сосудах примерно на 1.4 мм ( $z \approx 1.4$  мм).

*Влияние градиента температуры вдоль базы прибора.* Если градиент температуры вдоль базы прибора  $l$  постоянен и составляет  $T_l$ , то температура как функция координаты  $x$  вдоль базы может быть аппроксимирована законом

$$T(x) = \left( 1 + \frac{T_l}{T_1} x \right) T_1,$$

где  $T_1$  – температура вблизи одного из измерительных сосудов. Тогда разность уровней в концевых сосудах нивелира составит  $\Delta z \approx T_l H \beta_{ж} l$ , где  $H$  – начальная высота уровня жидкости в сосудах.

При градиенте  $T_l = 10^{-3}$  °С/м ( $\Delta T = T_1 - T_2 = 3$  °С),  $H \approx 10$  см разность уровней в сосудах  $\Delta z$  составит 0.2 мм.

К ошибкам при измерениях приводит не сам градиент температуры (если он постоянен, то и ложных вертикальных движений сосудов не будет), а его изменение во времени.

Если изменение градиента температуры приводит к изменению разности температур концевых сосудов  $\Delta(\Delta T)$ , то  $\Delta(\Delta z) = \Delta(\Delta H \beta_{ж})$ . Так, при  $\Delta(\Delta T) = 1$  °С величина  $\Delta(\Delta z)$  равна  $\approx 0.06$  мм (или 60 мкм).

Прецизионные измерения температуры вдоль соединительной трубки и вблизи концевых сосудов позволяют снизить рассматриваемое влияние до долей микрона.

*Влияние динамических параметров гидростатического нивелира.* Гидростатический нивелир представляет собой сложную колебательную систему. Согласно [Манукин, Ребров, 1996], уравнение движения жидкости имеет вид

$$\frac{4}{3} \rho s l \left( \frac{S}{s} \right)^2 \ddot{z} + 8 \pi \mu l \left( \frac{S}{s} \right)^2 \dot{z} + 2 \rho g S z = -\rho l S \ddot{X}(t) - \rho S g l \varphi(t) - \rho S H l \ddot{\varphi}(t), \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $\rho$  – её плотность.

Три члена в правой части уравнения (1) отображают внешние воздействия, приводящие к вариациям уровня в измерительных сосудах:  $\rho l S \ddot{X}(t)$  – влияние горизонтальных движений  $X(t)$  всего прибора;  $\rho S g l \varphi(t)$  – воздействие наклонов всей базы прибора;  $\rho S H l \ddot{\varphi}(t)$  – влияние угловых ускорений при наклонах базы.

Введя понятия эффективной массы  $m_{eff}$ , эффективного коэффициента трения  $h_{eff}$  и эффективной жесткости  $K_{eff}$  в виде

$$m_{eff} = \frac{4}{3} \rho s l \left( \frac{S}{s} \right)^2; \quad h_{eff} = 8 \pi \mu l \left( \frac{S}{s} \right)^2; \quad K_{eff} = 2 \rho g S, \quad (2)$$

запишем уравнение (1) в каноническом виде

$$\ddot{z} + 2\delta\dot{z} + \omega_0^2 z = -\frac{3s}{4S} (\ddot{X}(t) + g\varphi(t) + H\ddot{\phi}(t)).$$

С принятыми ранее значениями параметров получим оценку значения собственной частоты:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_{eff}}{m_{eff}}} = \sqrt{\frac{3gs}{2lS}} \approx 1.4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (3)$$

т.е. собственный период  $T_0 \approx 400$  с. Эта величина может быть увеличена в несколько раз при соответствующем увеличении  $S/s$  и  $l$ . Нужно отметить, что такой период, являющийся предельным для современных маятниковых сейсмометров, воспроизводится и сохраняется с погрешностью 25 % [Гравиров, Кислов, 2008; Ingate, Berger, 2004].

Коэффициент затухания  $\delta$ , выраженный через кинематическую вязкость  $\nu$ , рассчитывается как  $\delta = \frac{3\pi\mu}{\rho s} = \frac{3\pi\nu}{s}$ ; при  $\nu = 10^{-2} - 10^{-3}$  Ст,  $s = 3$  см<sup>2</sup> значение  $\delta$  составляет  $3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}$  1/с. Это выражение для  $\delta$  является неочевидным, поскольку в него не вошли ни плотность жидкости  $\rho$ , ни длина базы  $l$ , а только кинематическая вязкость  $\nu$  и сечение трубки  $s$ . Таким образом, можно в широком диапазоне практически независимо управлять затуханием и собственным периодом прибора, выбирая соответствующие параметры, соотносясь с конкретными обстоятельствами и предполагаемыми характеристиками изучаемых процессов.

Рассмотрим влияние горизонтальных движений всего прибора. Отклик на гармоническое воздействие на частоте  $p$  ( $X = x_0 e^{-ipt}$ ) имеет вид

$$z = \frac{3sx_0 p^2}{4S \sqrt{(p^2 - \omega_0^2)^2 + 4\delta^2 p^2}}. \quad (4)$$

Для оценки величины  $x_0$  воспользуемся результатами работы [Fix, 1972], в которой приводится спектральная плотность мощности сейсмических шумов в области периодов от  $10^{-2}$  с до 2000 с. Следуя [Гусев, Манукин, 1985], зависимость спектральной плотности от частоты можно аппроксимировать зависимостью  $\bar{x}_p^2 \sim B/p^4$ , где  $B$  характеризует сейсмичность выбранного района измерений.

Значение  $\sqrt{z(p)_c^2}$  (корень из среднеквадратичного отклонения уровня жидкости в сосуде из-за воздействия сейсмических колебаний) в полосе частот  $\Delta p$  зависит от величины  $p$  и, например, для случая  $p \sim \omega_0 \sim \delta$  с учетом того, что  $\Delta p = 2\pi/T$  ( $T$  – время измерения), имеет вид:

$$\sqrt{z(p)_c^2} \approx \frac{l}{2g} \sqrt{\frac{\pi B}{T}}.$$

Если  $B = 10^{-9}$  см<sup>2</sup>·с<sup>-3</sup>, то при длине базы прибора  $l = 3$  км и  $T = 400$  с получаем  $\sqrt{z(p)_c^2} \approx 4 \cdot 10^{-4}$  см = 4 мкм.

Оценка величины собственных тепловых шумов показывает, что их влияние относительно невелико:  $\sqrt{z(p)_T^2} = \sqrt{\frac{\kappa\Theta}{2\rho g S}} \approx 10^{-9}$  см для ранее выбранных параметров нивелира (здесь  $\kappa$  – постоянная Больцмана,  $\Theta$  – абсолютная температура).

### Применение длиннобазисного гидростатического нивелира для глобальных геофизических исследований

Принцип работы и технические характеристики ДГН позволяют применять его для анализа не только геофизических процессов в земной коре, но и процессов планетарного (глобального) характера, происходящих на больших глубинах внутри Земли. Рассмотрим некоторые из них.

*Измерение вариации угловой скорости вращения Земли внутри суток.* Вариации угловой скорости Земли внутри суток могут быть связаны с глобальными процессами, приводящими к изменениям момента инерции планеты, процессами в её гидро- и аэросферах. Изменение угловой скорости приводит к возникновению тангенциального ускорения. Если гидростатический нивелир установлен на широте  $\Theta$  и ориентирован в направлении восток–запад, то вдоль его базы будет действовать ускорение

$$a_{\tau} = R \cos \Theta \dot{\omega} \approx R \cos \Theta \frac{\Delta\omega}{\Delta T},$$

где  $R$  – радиус Земли;  $\Delta\omega$  – изменение угловой скорости вращения Земли за время  $\Delta T$ .

Разность уровней в концевых сосудах составит  $Z = l \frac{a_{\tau}}{g}$ ; при этом относительное изменение угловой скорости –

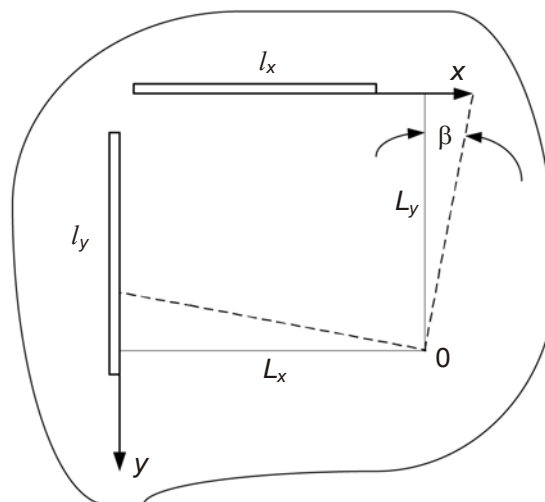
$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{g\Delta TZ}{lR \cos \Theta \omega}.$$

Если  $Z=1$  мкм, то с помощью гидростатического нивелира с базой 1 км можно было бы за время  $\Delta T=10^3$  с измерить относительное изменение угловой скорости Земли  $\Delta\omega/\omega=5 \cdot 10^{-8}$ . Принимая во внимание то, что чувствительность по регистрации вертикальных смещений уровня жидкости на 2–3 порядка выше, то представляется реальным обнаружение с помощью ДГН изменения угловой скорости Земли на уровне  $\Delta\omega/\omega = 5 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-11}$  за  $1 \cdot 10^3$  с и  $\Delta\omega/\omega = 5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-10}$  за  $1 \cdot 10^4$  с.

Из курса астрономии [Кононович, Мороз, 2001] известно, например, что длительность суток по каким-то причинам может изменяться скачком на несколько миллисекунд, что при пересчете в относительные суточные вариации соответствует изменениям в восьмом знаке. Это в десятки–сотни раз превышает порог вариаций скорости вращения Земли, которые могут быть обнаружены при использовании ДГН.

*Измерение крутильных подвижек блоков литосферы.* В соответствии с формулой (1а), гидростатический нивелир кроме движений в вертикальной плоскости “чувствует” неравномерные и вращательные движения в горизонтальной. По сути, прибор для измерения медленных горизонтальных крутильных колебаний и движений участков земной коры является также “наклономером”, который в отличие от классических наклономеров измеряет наклоны не вокруг двух горизонтальных осей, а “наклоны (движения) вокруг вертикальной оси”. Такие измерения принципиально отличаются от обычных наклономерных, поскольку последние проводятся относительно местной гравитационной вертикали. В случае же измерений “наклонов вокруг вертикальной оси” возможны лишь измерения инерционного типа. В этом смысле названные измерения сходны с хорошо известными сейсмическими измерениями, где на пробное тело воздействуют силы инерции.

Условная схема измерения крутильных подвижек блока литосферы с помощью двух ортогонально размещенных гидростатических нивелиров с равными базами  $l_x$ ,  $l_y$  изображена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема измерения крутильных подвижек блока литосферы с помощью двух ДГН.  $L_x$  и  $L_y$  характеризуют размеры блока литосферы с периферическим центром вращения  $O$

При вращательном колебательном движении блока с угловой скоростью  $\Omega \ll \omega_0$  значения линейных ускорений вдоль осей  $X$  и  $Y$ , а также относительное изменение уровней жидкости в концевых сосудах гидростатических нивелиров  $z_x$  и  $z_y$ , ориентированных вдоль осей  $X$  и  $Y$ , в квазистатическом приближении в соответствии с (4) могут быть записаны как

$$\ddot{x} = -\beta_0 \Omega^2 e^{i\Omega t} L_y; \quad z_x = \frac{l_x \ddot{x}}{2g} \cong \frac{l_x L_y \beta_0 \Omega^2}{2g};$$

$$\ddot{y} = -\beta_0 \Omega^2 e^{i\Omega t} L_x; \quad z_y = \frac{l_y \ddot{y}}{2g} \cong \frac{l_y L_x \beta_0 \Omega^2}{2g}.$$

Если  $l_x=l_y=1$  км, гипотетический литосферный блок имеет размеры  $L_x \times L_y \sim 1000 \times 1000$  км, а угловая скорость его “угловых колебаний”  $\Omega = 2\pi \cdot 10^{-5}$  рад/с (т.е. период около суток), то при разрешении изменения уровня жидкости в измерительном сосуде в 1 мкм получим  $(\beta_0)_{\min} = 5 \cdot 10^{-6}$  рад. На самом деле реальное разрешение может быть на 2–4 порядка выше за счет увеличения базы приборов  $l_x$ ,  $l_y$  и повышения точности измерения вариаций уровня, поэтому  $(\beta_0)_{\min} = 5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-10}$  рад (несколько угловых миллисекунд и долей миллисекунд). Эта простейшая оценка возможностей гидростатического нивелира при измерениях горизонтальных крутильных подвижек блоков литосферы соответствует измерению окружных скоростей на периметре блока  $\sim 10^{-6} - 10^{-8}$  м/с, что на 1–2 порядка ниже среднегодовой горизонтальной скорости смещения радиотелескопа в Симеизе, находящегося на краю Евразийской литосферной плиты [Вольвач, Петров, 2005]. Следовательно, можно утверждать, что ДГН позволяет наблюдать суточные вариации скорости вращения, например, Евразийской литосферной плиты. Оценка показывает высокое разрешение на низких частотах, характерных для медленных движений больших блоков.

Примером менее масштабных блоковых движений могут быть прерывистые движения, характерные для плохо изученных “тихих” землетрясений. Релаксация напряжений в геофизической среде осуществляется не только редким хрупким разрушением

“монолитов”. Можно допустить наличие эффективной релаксации “тихими” землетрясениями в процессе скольжения литосферных плит по глинистым прослоям [Obara, 2002] или из-за присутствия в твердом теле фазовой границы второго рода, что, как известно, эквивалентно постоянному присутствию “слоя смазки”, движение по которому не приводит к образованию метастабильных состояний (не имеет прямого последствия) [Калинин, Томашевская, 1982]. И в первом, и во втором случае в зависимости от показателя вязкости “слоя смазки” и угловой скорости вращения  $\Omega$  движение будет или монотонным, или с остановками. Известно, что вязкость в геофизических процессах является функцией многих параметров; твердо установлено, что она проявляет выраженную зависимость от температуры, частоты и скорости деформационных процессов.

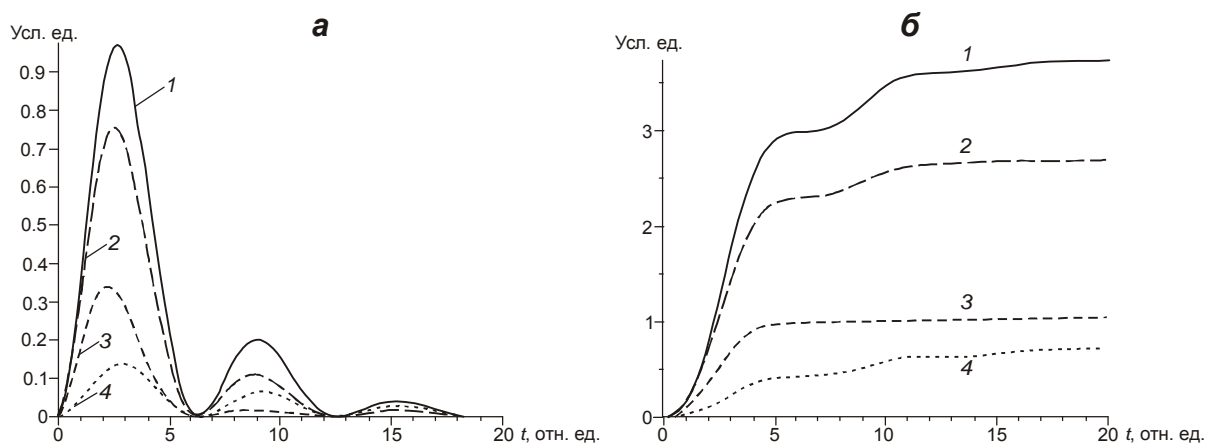
Если прерывистые движения имеют мягкие вступления и плавные остановки, то их спектр в низкочастотном диапазоне ограничен (является узкополосным). В связи с этим из-за малых амплитуд ускорений возможны измерения только специальной аппаратурой, которой в настоящее время не существует. Попробуем оценить возможности применения ДГН при изучении “тихих” землетрясений, для чего зададимся некоторыми модельными представлениями.

Аппроксимируем скорость предполагаемого поворота блока двухпараметрическим выражением

$$\dot{\beta}(t) = \frac{(1 - \cos(\Omega t))\Omega r^2}{r^2 + (r - \Omega)^2} e^{-\frac{1}{4}\sqrt{\Omega r}t}, \quad (5)$$

в котором  $\Omega$  – характерная частота колебательного процесса;  $r$  – некая частотно независимая часть декремента затухания движений блока (вязкость);  $t$  – текущее время. Варьируя  $r$ , можно промоделировать влияние абсолютного значения вязкости в межблоковых движениях на угловую скорость поворота блока. Структура экспоненциального показателя затухания, равного  $-\frac{1}{4}\sqrt{\Omega r}t$ , позволяет без введения дополнительного параметра промоделировать фактор частотной зависимости вязкости. Производная и интеграл от  $\dot{\beta}(t)$  – достаточно громоздкие выражения. Мы не будем их выписывать, ограничившись более наглядным графическим представлением.

На рис. 3 приведены графики изменения во времени угловой скорости (а) и угла поворота (б) блока при разных значениях вязкости  $r$ . Можно видеть, что скорость

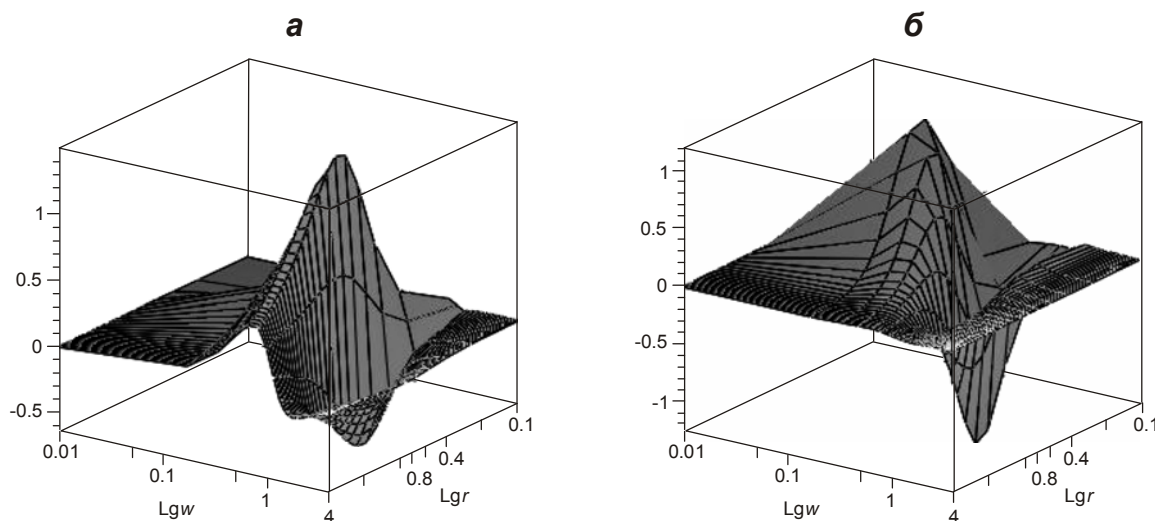


**Рис. 3.** Изменение во времени угловой скорости (а) и угла поворота (б) блока при разных значениях вязкости  $r$ :  $r=1$  (кривая 1);  $r=1.5$  (кривая 2);  $r=4$  (кривая 3);  $r=0.25$  (кривая 4). Расчеты выполнены при  $\Omega=1$



прерывистого движения и накопленный угол поворота максимальны, когда  $r=\Omega=1$ . Сильное отклонение от этого условия сопровождается вырождением движения в монотонную ползучесть.

На рис. 4 представлены действительные части спектров угловых ускорений блока (а) и отклика на них нивелира (б). Видно, что оба спектра, практически, укладываются в две декады и их максимальные компоненты сосредоточены вблизи  $\Omega$  и  $r=\Omega$ .



**Рис. 4.** Спектры угловых ускорений блока (а) и отклика нивелира на повороты блока (б) при  $\Omega=1, w_0=\delta=r$

Спектр отклика нивелира (рис. 4, б) естественным образом отличается от спектра возбуждающих ускорений. Современные методы цифровой регистрации и обработки сигналов позволяют убрать искажения и восстановить истинный спектр возбуждений. Точность восстановления тем выше, чем точнее известна передаточная функция первичного преобразователя.

В случае ДГН наибольшая неопределенность будет обусловлена изменяющейся вязкостью рабочей жидкости. Расчеты показывают, что в любом случае при десятипроцентной неопределенности  $\delta$  на временах, меньших  $2\pi/\Omega$ , ошибки восстановления скорости и угла поворота блока литосферы по показаниям ДГН не превышают 10%.

Можно оценить энергию, однократно сбрасываемую в таком процессе. Будем считать блок цилиндром с диаметром  $D=1000$  км, толщиной  $H=40$  км и плотностью  $\rho=3000$  кг/м<sup>3</sup>; полную сброшенную энергию упругих напряжений  $W$  примем равной удвоенной амплитуде кинетической энергии скольжения.

При повороте цилиндра вокруг образующей кинетическая энергия будет оцениваться как  $W_k = \frac{3}{64} \pi \rho H D^4 \dot{\beta}_{\max}^2$ .

Воспользовавшись графиками, приведенными на рис. 3, можно получить мажорантную оценку  $\dot{\beta}_{\max} \leq \frac{1}{4} \Omega \beta$ , выраженную через накопленный поворот и преобладающую частоту движений в “тихом” землетрясении. Окончательно получим, что при  $\beta_0=10^{-9}$  рад и  $\Omega=10^{-2}$  рад/с сброшенная энергия, рассчитанная по формуле  $W \leq 3\pi (H \rho_p D^4 \Omega^2 \beta_0^2) / 512$ , составляет 2 Дж. Столь малая энергия, соответствующая

магнитуде  $M \sim 2.5$ , и медленность процессов ее выделения в “тихих” землетрясениях объясняет слабую изученность последних.

Выполненная оценка показывает, что ДГН обеспечивает точность, чувствительность и частотный диапазон измерений, пока недостижимые другими средствами. Исключение, возможно, составляют наблюдения на радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (РСДБ). Но известно, что результаты многолетних измерений спутниковыми методами, геометрическим нивелированием и РСДБ имеют высокую достоверность по внутренним оценкам и, тем не менее, на порядок расходятся между собой, не позволяя существенно уточнить динамическую модель Земли [Гравиметрия..., 2010]. Комплексование измерений с использованием РСДБ и длиннобазисных нивелиров может существенно продвинуть нас в изучении динамики литосферных плит и блоков земной коры. Авторы понимают, что длиннобазисный нивелир – не лабораторный прибор, его реализация сопряжена со значительными и не только научными проблемами.

*Отклик на движение внутреннего ядра Земли.* Факт существования трансляционных колебаний внутреннего ядра известен давно [Busse, 1970; Авсюк, 1973]. Весь вопрос в амплитуде возможных движений и их последствиях, которые могут затрагивать практически все сферы в жизни Земли и человечества [Баркин, 2007].

С математической точки зрения, динамика внутреннего ядра Земли – задача многих (пяти и более) тел, осложненная нелинейностями, переносом вещества и сложной термодинамикой, в связи с чем она не имеет точного аналитического решения. Могут быть построены приближенные решения, но их качество и достоинства целиком определяются исходными модельными представлениями и выбором параметров геофизической среды.

По состоянию на текущий момент сделать аргументированный выбор модели и параметров невозможно. Поэтому, сколько исследователей – столько и вариантов; с некоторой выборкой из этих вариантов можно познакомиться в статьях [Barkin, 2009a, б]. Безусловным успехом в решении такой сложной проблемы будет измерение амплитуды движений ядра с периодами более одного часа.

В работе [Гурашвили и др., 1999] обсуждалась возможность регистрации трансляционных колебаний внутреннего ядра Земли с помощью двух разнесенных вертикальных маятников. Ниже рассматривается возможность решения той же задачи с помощью ДГН.

При перемещении внутреннего ядра Земли на величину  $D$  гравитационный центр сместится на величину  $b$  (рис. 5). Из представленной на рисунке схемы достаточно просто рассчитать изменение горизонтальной составляющей силы гравитационного притяжения, воздействующей на каждый элемент жидкости в соединительной трубке ДГН с базой  $L$ :

$$R_1^2 = R^2 + b^2 + 2bR \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = R_0^2 \left( 1 + \left(\frac{b}{R_0}\right)^2 + \frac{2b}{R_0} \phi \right),$$

$$R_2^2 = R^2 + b^2 - 2bR \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = R_0^2 \left( 1 + \left(\frac{b}{R_0}\right)^2 - \frac{2b}{R_0} \phi \right),$$

$$dF_1 = \frac{GM_E \rho s dl}{R_1^2}; \quad dF_{1x} = dF_1 \sin(\phi + \gamma),$$

$$dF_2 = \frac{GM_E \rho s dl}{R_2^2}; \quad dF_{2x} = dF_2 \sin(\phi - \gamma),$$

$$R = \frac{R_0}{\cos \phi},$$

$$dF_1 - dF_2 = \rho g s \frac{2b}{R_0} dl,$$

где  $G$  – гравитационная постоянная;  $M_E$  – масса Земли;  $R_0$  – радиус Земли;  $s$  – площадь сечения соединительной трубки;  $\rho$  – плотность жидкости.

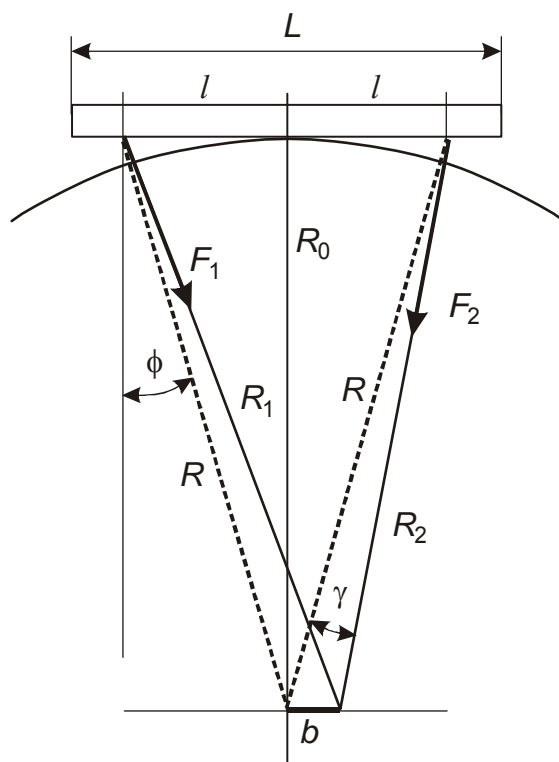


Рис. 5. Схема измерения перемещения внутреннего ядра Земли с помощью ДГН

Суммарная горизонтальная сила определяется как

$$F = g s \rho L \frac{b}{R_0}, \tag{6}$$

где  $g = \frac{GM_E}{R_0^2}$  – ускорение свободного падения.

Перемещение центра притяжения Земли  $b$  при перемещении внутреннего ядра на величину  $D$  определяется соотношением  $b = D \frac{V_{ic}(\rho_{ic} - \rho_l)}{M_E}$ , в котором  $(\rho_{ic} - \rho_l) = \Delta\rho$  – разность плотности внутреннего и внешнего ядер;  $V_{ic}$  – объем внутреннего ядра Земли. [Гурашвили и др., 1999]. В разных моделях  $\Delta\rho$  находится в пределах от 0.7 до 1.8 г/см<sup>3</sup>.

Наличие горизонтальной силы  $F$  (см. формулу (6)) приведет к изменению уровня жидкости в каждом сосуде нивелира на величину  $z$ , которую можно определить, приравняв силу  $F$  силе гидростатического давления  $F_d$ , возникающей при изменении уровней:  $F_d = 2z\rho g s = F = g s \rho L \frac{b}{R_0}$ , откуда следует, что  $z \approx bL/2R_0$ .

При смещении внутреннего ядра на 1 м уровень жидкости в измерительном сосуде изменится на 0.25 мкм, что в 400 раз превышает разрешение прибора. Это в принципе позволит с достаточной точностью отслеживать колебательные движения внутреннего ядра Земли.

### Заключение

Благодаря своим характеристикам, длиннобазисный гидростатический нивелир (ДГН) может считаться уникальным прибором, обеспечивающим проведение геофизических измерений при исследованиях приливных явлений и деформационных процессов в земной коре, изучении вариаций угловой скорости вращения Земли с разрешением  $\Delta\omega/\omega = 5 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-11}$  за  $1 \cdot 10^3$  с и  $\Delta\omega/\omega = 5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-10}$  за  $1 \cdot 10^4$  с, анализе крутильных подвижек блоков литосферы с разрешением 0.001" (угл. сек.) в сутки, регистрации "тихих" землетрясений, начиная с малых магнитуд.

Применение ДГН позволяет реально подойти к решению проблем калибровки относительных изменений высот опорных пунктов, получаемых спутниковой альтиметрией над континентами, повысить информативность наблюдений с радиоинтерферометрами со сверхдлинной базой путем комплексирования их с измерениями с помощью длиннобазисных нивелиров, измерять трансляционные колебания внутреннего ядра Земли.

### Литература

- Авсюк Ю.Н. О движениях внутреннего ядра Земли // Докл. АН СССР. 1973. Т. 212, № 5. С.1103–1105.
- Гравиметрия и геодезия / Отв. ред. Б.В. Бровар. М.: Научный мир, 2010. 570 с.
- Баркин Ю.В. Свободные трансляционные колебания системы ядро–мантия Земли и вариации природных процессов с часовыми периодами // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 1/2. С.101–110.
- Вольвач А.Е., Петров Л.Ю. Результаты измерения горизонтальной скорости движения радионастрономической станции Симеиз // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2005. Т. 101. С.203–214.
- Гравиров В.В., Кислов К.В. Критичность сейсмометра к вариациям параметров // Электронный научный журнал "Исследовано в России". <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/026.pdf>
- Гурашвили В.А., Гусев Г.А., Манукин А.Б., Николаев А.В. О возможности измерения движений внутреннего ядра Земли системой разнесенных вертикальных маятников // Физика Земли. 1999. № 5. С.14–19.
- Гусев Г.А., Манукин А.Б. Маятниковый двухкоординатный наклономер // Физика Земли. 1982. № 7. С.86–88.
- Гусев Г.А., Манукин А.Б. Предельная чувствительность гравиинерциальных приборов при измерении квазистатических процессов // Физика Земли. 1985. № 9. С.90–95.
- Гусев Г.А., Кокорев В.К., Манукин А.Б., Попов Е.И., Ребров В.И. Измерения наклонов и деформаций в штольне г. Обнинска // Гравиинерциальная аппаратура в геофизических исследованиях. М.: ИФЗ АН СССР, 1988. С.5–17.
- Калинин В.А., Томашевская И.С. О пластичности минералов при фазовых переходах // Докл. АН СССР. 1982. Т. 268, № 1. С.59–61.
- Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии. М.: Едиториал УРСС, 2001. 544 с.
- Манукин А.Б., Ребров В.И. Измерение низкочастотных сейсмических процессов с помощью гидростатических нивелиров и деформометров // Физика Земли. 1996. № 6. С.69–72.
- Манукин А.Б., Казанцева О.С., Бехтерев С.В., Калинин И.И., Матюнин В.П. Длиннобазисный гидростатический нивелир // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 4. С.26–34.

- Barkin Yu.V.* Prediction of erroneous altimetry velocities and an explanation of observably coastal velocities of increase of a global mean sea level and mean sea levels in northern and southern hemispheres // Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2009а. Т. 5. С.183–187.
- Barkin Yu.V.* Crisis in geosciences in epoch of altimetry measurements and ways of its overcoming // Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2009б. Т. 5. С.188–192.
- Busse F.H.* The dynamical coupling between inner core and mantle of the Earth and the 24-year libration of the pole // Earthquake Displacement Fields and the Rotation of the Earth. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing company, 1970. V. 20. P.88–98.
- Fix J.E.* Ambient earth motion in the period range from 0.1 to 2560 sec. // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1972. V. 62. P.1753.
- Ingate S., Berger J.* Prospects for low-frequency seismometry, Report of the IRIS Broadband Seismometer Workshop. 2004. (<http://www.iris.edu/stations/seisWorkshop04/seisWorkshop.htm>).
- Obara K.* Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan // Science. 2002. V. 296. P.1679–1681.

#### *Сведения об авторах*

**МАНУКИН Анатолий Борисович** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-23-50. E-mail: amanukin@yandex.ru

**КАЗАНЦЕВА Ольга Сергеевна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-23-50. E-mail: ok800@ifz.ru

**КАЛИННИКОВ Игорь Иванович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-23-50. E-mail: i-kalinn@yandex.ru

**БЕХТЕРЕВ Сергей Вадимович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-23-50. E-mail: calm@tula.net

**РЕБРОВ Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(495) 652-65-06. E-mail: virebrov@yandex.ru

## **NEW OPPORTUNITIES FOR THE USE OF LONG-BASELINE HYDROSTATIC LEVELS FOR MEASURING SOME OF THE GLOBAL (PLANETARY) GEOPHYSICAL EFFECTS**

A.B. Manukin, O.S. Kazantseva, I.I. Kalinnikov, S.V. Bekhterev, V.I. Rebrov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** The article is devoted to the new opportunities of application of hydrostatic level functionalities application offered by a significant increase in the linear base of the instrument. It turns out that besides the classic problems of measuring tilts and deformations of the Earth surface, hydrostatic levels with a base of several kilometers can be used to obtain regional and global information about the Earth. Detailed analysis of three tasks is provided in the paper: measurement of uneven rotation of the Earth within a day, measurement of possible small

torsional motions of individual blocks of the lithosphere, measurement of small translational oscillations of the Earth's inner core at periods of a few hours. The main attention is paid to the potential of such a device. It is demonstrated that irregularity in angular velocity of the Earth's rotation can be measured with relative precision of  $\Delta\omega/\omega = 5 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-11}$  per 1000 sec and  $\Delta\omega/\omega = 5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-10}$  per  $10^4$  sec, horizontal rotating shifts of lithosphere blocks can be measured with accuracy of  $10^{-4}$  sec for a period of  $10^5$  sec (day) and the amplitude of the translational oscillations of the Earth's inner core, which could be measured by hydrostatic leveling with a baseline of a few centimeters. The uniqueness of this tool opens a new area of its application and a new channel of obtaining information about the Earth.

**Keywords:** long-baseline hydrostatic level, method of measurement, dynamic range, global geophysical research, uneven rotation of the Earth, blocks of the lithosphere, translational oscillations of the inner core.