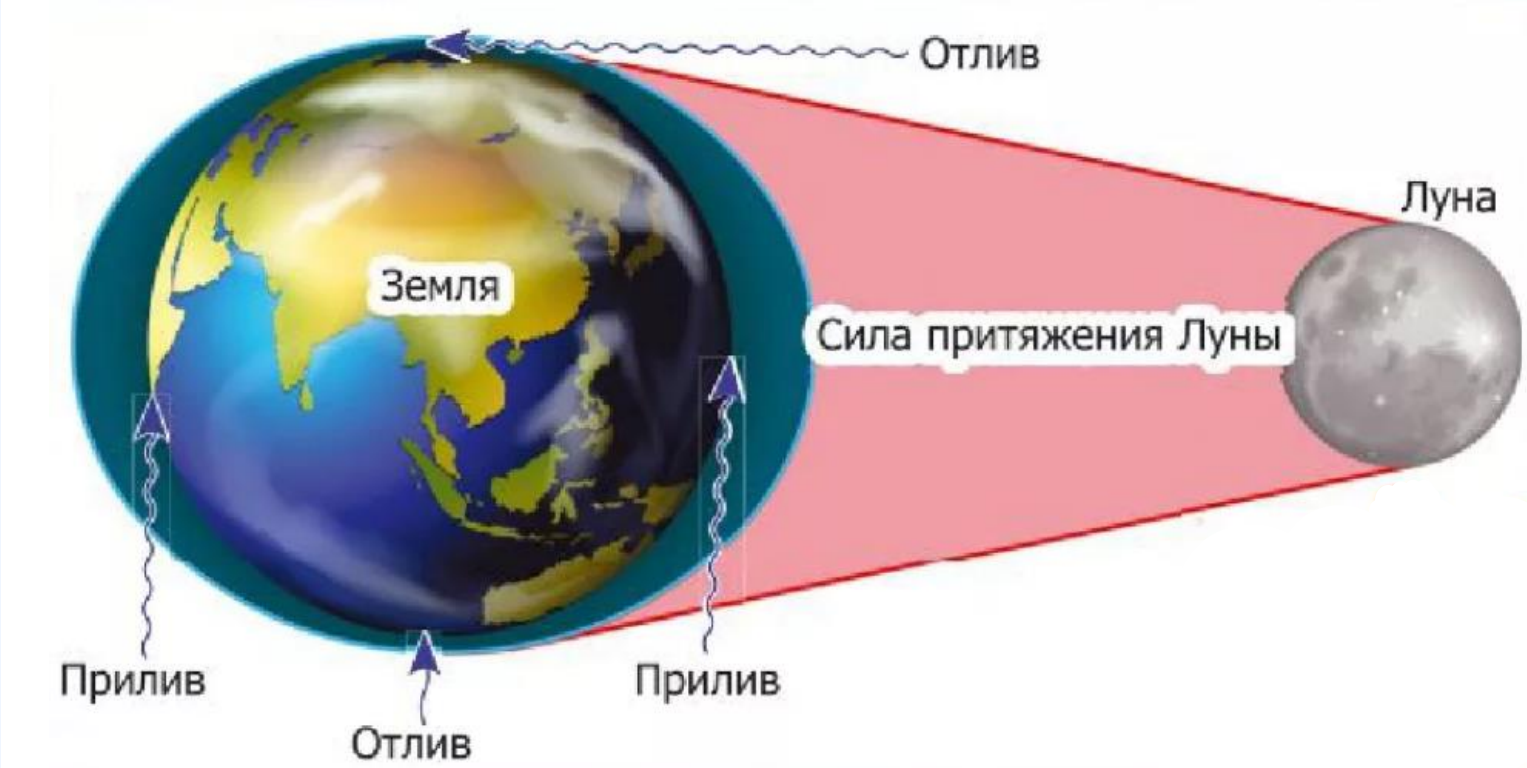
Л14. ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ВО ВРЕМЕНИ



Содержание

- Вариаций силы тяжести во времени
- Приливные изменения силы тяжести
- Классификация приливных волн
- Поправка за приливные изменения силы тяжести в результаты гравиметрических наблюдений

Вариаций силы тяжести во времени

С течением времени величина и направление силы тяжести изменяются.

Эти изменения принято делить на приливные и неприливные. Неприливные изменения силы тяжести можно разделить на вековые, периодические и непериодические.

Приливные изменения силы тяжести вызваны изменением взаимного положения Земли и других небесных тел, в основном Луны и Солнца.

Эти изменения наиболее хорошо изучены и дают ценную информацию для исследований внутреннего строения Земли, потому что величина приливообразующей силы точно известна, а отношение наблюдаемых приливных вариаций силы тяжести к теоретическим зависит только от **упругих свойств Земли.**

Вариаций силы тяжести во времени

Причинами вековых изменений силы тяжести могут быть вековые изменения центробежной силы вследствие векового изменения скорости вращения Земли, гипотетическое уменьшение постоянной тяготения и изменения, связанные с самой Землей.

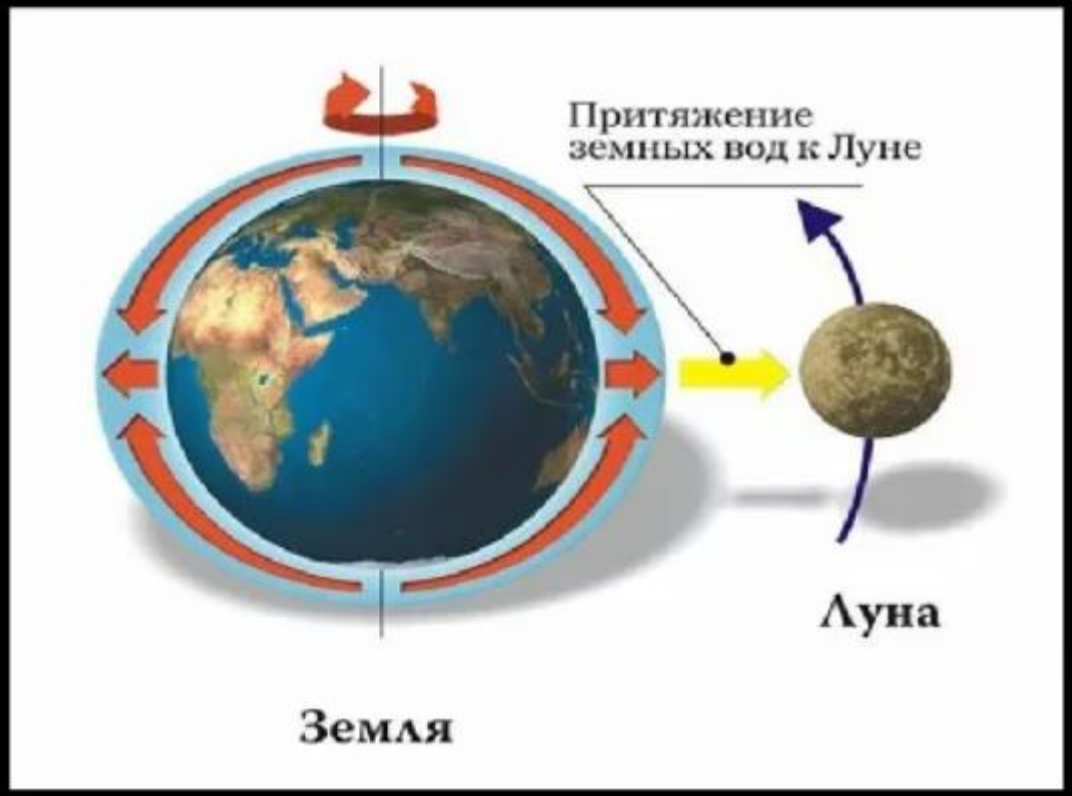
К ним можно отнести перемещение глубинных масс в недрах Земли, движение литосферных плит, вековые движения земной коры, изменение физических свойств вещества Земли.

Величины возможных скоростей вековых изменений силы тяжести ничтожны.

При существующем вековом уменьшении скорости вращения Земли на $14 \cdot 10^{-13}$ рад/с в столетие, увеличение силы тяжести на экваторе составит $+15 \cdot 10^{-22}$ мкГал за 1000 лет.

Вековые изменения силы тяготения, обусловленные геофизическими причинами, могут быть больше. Изменение плотности плоского слоя толщиной 100 км всего на 0,01 кг/м3, сила тяжести изменится на 40 мкГал.

Причины приливов и отливов



- Притяжение Луны влияет на Землю, создавая приливы и отливы.

- Земное притяжение удерживает Луну, заставляя её вращаться вокруг Земли. Луна притягивает воду в океанах так, что получается два «водяных горба»: вращаясь вокруг Земли, Луна тянет эти «водяные горбы» за собой.

Вариаций силы тяжести во времени

Причиной периодических (неприливных) изменений силы тяжести являются разного рода метеорологические факторы:

- ✓ периодические (годовые и суточные) колебания атмосферного давления,
- ✓ сезонные выпадения осадков,
- ✓ колебания уровня грунтовых вод и влажности почвы.

Амплитуды этих изменений невелики: так, вследствие суточных колебаний атмосферного давления вариации силы тяжести составляют 3—5мкГал.

Периодические колебания силы тяжести вызываются и собственными колебаниями Земли, возникающими вследствие землетрясений и штормов в океане.

Вариаций силы тяжести во времени

Постоянно регистрируются колебания Земли с периодом 5—10 с и амплитудой до 10 мкм, вызывающие изменения силы тяжести с амплитудой до 1 мГал.

Непериодические вариации силы тяжести обусловлены многими причинами, среди которых:

- непериодические колебания скорости вращения Земли,
- землетрясения и вулканизм,
- непериодические колебания атмосферного давления (связанные с образованием циклонов и антициклонов),
- выпадение осадков,
- непериодические колебания влажности почвы и уровня грунтовых вод,
- деятельность человека.

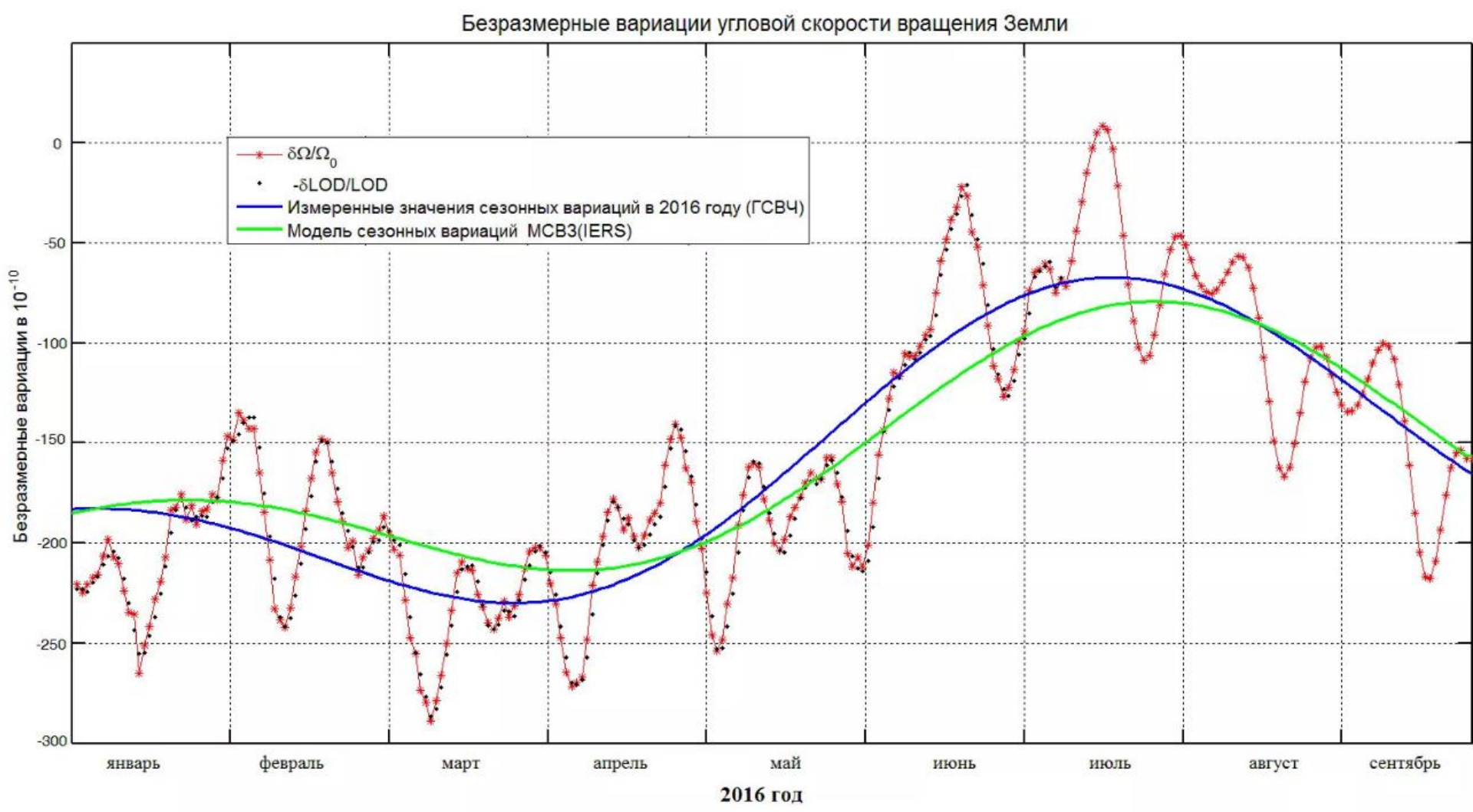
Вариаций силы тяжести во времени

Вызываемые названными явлениями изменения силы тяжести могут быть сравнительно велики.

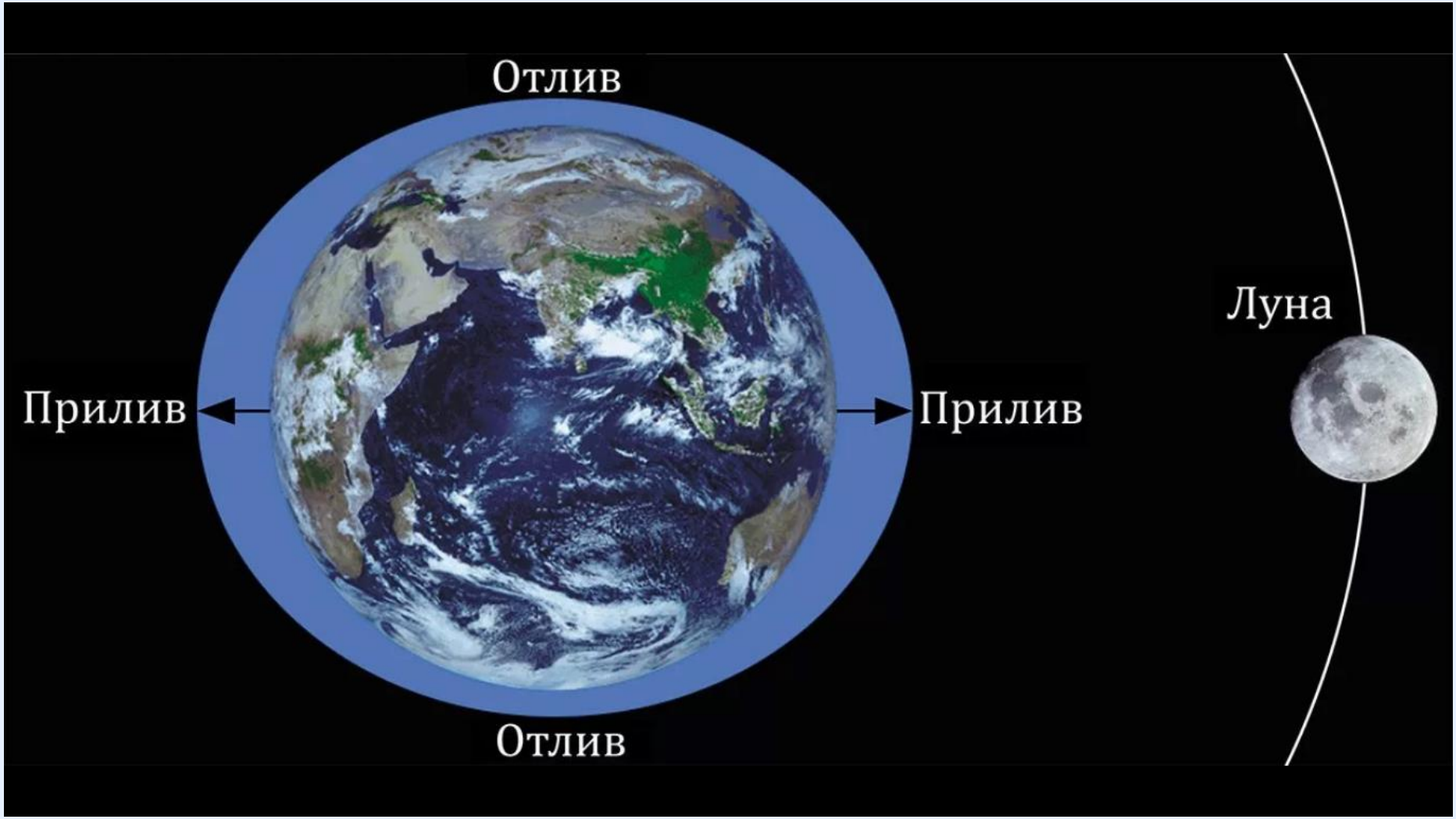
Например:

- ✓ наблюдаемые при астрономических определениях вариации скорости вращения Земли вызывают изменения силы тяжести на 2—3 мкГал в месяц;
- ✓ в Токио (Япония) зарегистрированы уменьшение силы тяжести со скоростью 11 мкГал/год в течение семи лет и увеличение силы тяжести со скоростью 18 мкГал/год в течение четырех лет, обусловленные колебаниями уровня грунтовых вод;
- ✓ строительство котлована глубиной 1 м (например, при открытом способе добычи полезных ископаемых) вызовет изменение силы тяжести на границе этого котлована приблизительно на 0,05 мГал.

Вариаций силы тяжести во времени



Приливные изменения силы тяжести



Приливные изменения силы тяжести

В каждый момент времени приливная сила различна в разных точках Земли и зависит от зенитного расстояния небесного тела.

Эта сила имеет два минимума при z = 0° или z=180°, т. е. когда небесное тело находится в зените и надире, максимум при z = 90°, когда небесное тело находится на горизонте, и равна нулю при z = 54,7° или 125,3°.

На рис. 140 показано распределение приливной силы по поверхности Земли; эта сила стремится растянуть Землю вдоль линии OO_1 соединяющей центры Земли и небесного тела.

$$\delta\vartheta = \frac{3}{2}\frac{fmR}{g\rho^3}\sin 2z,$$

где g —сила тяжести в точке А.

Изменения направления отвеса максимальны при z = 45° и 135°; при z и= 0°, 90° и 180° приливные отклонения отвеса (и наклоны уровенной поверхности) равны нулю.

Приливные изменения элементов гравитационного поля Земли вызваны в основном влиянием Луны и Солнца. Оценим их численные значения.

Принимая

$$fm_{☾} = 4903\ \text{км}^3\cdot\text{с}^{-2},\quad \rho_{ср☾} = 384395\ \text{км для Луны},$$
$$fm_{☉} = 132496\cdot 10^6\ \text{км}^3\cdot\text{с}^{-2},\quad \rho_{ср☉} = 149{,}5\ \text{млн. км для Солнца},$$

(VII.7)

Приливные изменения силы тяжести

/ $fm_{☾} = 4903$ км$^3 \cdot$с$^{-2}$, $\rho_{ср☾} = 384395$ км для Луны,

$fm_{☉} = 132496 \cdot 10^6$ км$^3 \cdot$с$^{-2}$, $\rho_{ср☉} = 149{,}5$ млн. км для Солнца,

(VII.7)

$R = 6371024$ м, $g = 980624$ мГал,

по формулам (VII.5) и (VII.6) получаем

для Луны $\delta g_{☾} = 54{,}99\,(1 - 3\cos^2 z)$ мкГал

$\delta\vartheta_{☾} = 0{,}01733'' \sin 2z$,

для Солнца $\delta g_{☉} = 25{,}26\,(1 - 3\cos^2 z)$ мкГал

$\delta\vartheta_{☉} = 0{,}00796'' \sin 2z$.

Наибольшее возможное изменение силы тяжести и направления отвеса из-за совместного влияния Луны и Солнца составляет

для δg (при изменении z от 0° до 90°)
влияние Луны 165 мкГал
влияние Солнца 76 мкГал
совместное влияние 241 мкГал

для $\delta\vartheta$ (при изменении z от 45° до 135°)
влияние Луны 0,035″
влияние Солнца 0,016″
совместное влияние 0,051″.

Приливные изменения силы тяжести

Приведенные численные значения относятся к твердой недеформируемой Земле. Но Земля не является абсолютно твердым телом, и под действием Луны и Солнца испытывает упругие деформации.

Вертикальные смещения поверхности Земли при этих деформациях могут достигать 40—50 см на суше и более 10 м на море.

Для деформируемой Земли изменения силы тяжести будут больше, чем для твердой, а колебания направления отвеса — меньше.

Это объясняется тем, что под действием приливной силы Земля растягивается в направлении OO_1 поэтому точки A1 и A2 удаляются от центра масс, что вызывает дополнительное уменьшение силы тяжести в этих точках; в точке A3, напротив, сила тяжести получит дополнительное увеличение, так как эта точка приблизится к центру Земли (см. рис. 140).

Наклоны уровенной поверхности для деформируемой Земли будут меньше, потому что физическая поверхность также будет испытывать наклоны.

Если бы Земля была идеально упругой, то колебания наклонов уровенной поверхности относительно физической поверхности Земли не наблюдались бы.

Если определять колебания направления отвеса относительно неподвижных звезд, то для деформируемой Земли эти колебания будут больше, чем для твердой, из-за косвенного влияния приливных деформаций.

Приливные изменения силы тяжести для деформируемой Земли связаны с изменениями для твердой Земли соотношением:

Приливные изменения силы тяжести

/

$$\overline{\delta g} = \delta g \left(1 + h_2 - \frac{3}{2} k_2\right), \qquad \text{(VII.8)}$$

Где h2 и k2 —числа Лява, которые являются безразмерными параметрами,
h2 представляет собой отношение высоты прилива в твердой Земле к высоте статического океанического прилива,
k2 — отношение дополнительного потенциала, возникшего вследствие деформации Земли, к приливному потенциалу.
Высокоточные наблюдения на приливных станциях показывают, что численные значения амплитуды приливных колебаний силы тяжести для деформируемой Земли приблизительно в 1,2 раза больше, чем для твердой/
Совместное влияние Луны и Солнца для деформируемой Земли достигает 0,3 мГал.
Колебания направления отвесной линии (наклоны уровенной поверхности) регистрируют или относительно поверхности Земли (при наблюдениях с наклономерами) или относительно оси вращения Земли (при астрономических наблюдениях). Для твердой Земли оба метода дали бы один и тот же результат.
Наблюдаемые колебания отвеса $\overline{\delta\vartheta}$ вязаны с колебаниями $\overline{\delta\vartheta}_2$ для твердой Земли равенствами

$$\overline{\delta\vartheta}_1 = \delta\vartheta\,(\overline{1} + k_2 - h_2) \qquad \text{(VII.9}a\text{)}$$

при регистрации относительно поверхности Земли и

Приливные изменения силы тяжести

Теория приливных изменений силы тяжести и других элементов гравитационного поля для реальной Земли, деформируемой приливами, достаточно сложна. Поэтому при рассмотрении характера приливных изменений силы тяжести будем считать Землю твердым недеформируемым шаром радиуса R, небесное тело — материаль-

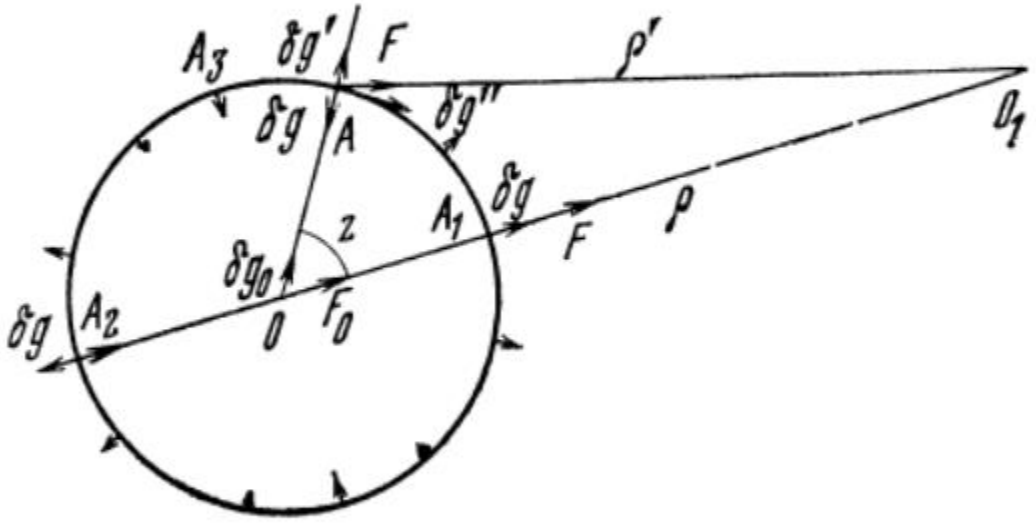


Рис. 140

ной точкой массы m. Построенная при этих предположениях теория называется *статической теорией приливов*.

Приливы и отливы





Приливные изменения силы тяжести

$$\overline{\delta\vartheta}_2 = \delta\vartheta\,(1 + k_2 - l_2) \qquad \text{(VII.9}\textit{б}\text{)}$$

при регистрации относительно оси вращения Земли.

В формуле (VII.96) l_2 —число Сида, равное отношению горизонтального приливного смещения земной коры к горизонтальному смещению при статическом океаническом приливе. Наблюдения приливных эффектов позволили установить, что для Земли

$$\overline{\delta\vartheta}_1 \cong 0{,}7\delta\vartheta, \quad \overline{\delta\vartheta}_2 \cong 1{,}1\delta\vartheta.$$

Числа Лява и Сида являются основными величинами в теории приливных деформаций Земли. Наблюдения приливов позволяют измерить разные комбинации этих безразмерных параметров.

С другой стороны, эти числа можно вычислить, если задан закон изменения плотности внутри Земли и ее упругие свойства. Сопоставление наблюденных и вычисленных чисел Лява и Сида позволяет исследовать внутреннее строение и свойства Земли.

Классификация приливных волн

Вычисление приливных изменений гравитационного поля по формулам (VII.3), (VII.5) и (VII.6) неудобно, так как в эти формулы входит зенитное расстояние светила, которое изменяется с течением времени и зависит от многих параметров — положения точки наблюдения на Земле, координат небесного тела, момента наблюдений.

Преобразуем выражение для приливного потенциала следующим образом. Пусть на рис. 141 O_1 и A —проекции небесного тела и точки земной поверхности на небесную сферу, P — полюс.

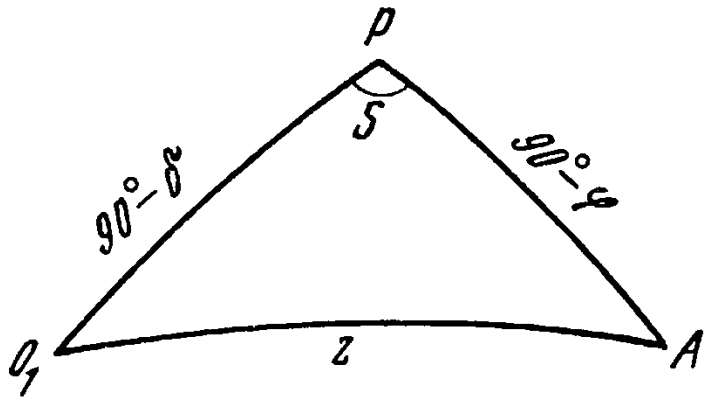


Рис. 141

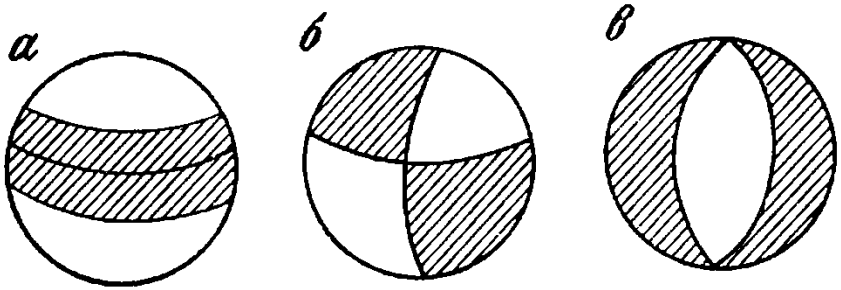


Рис. 142

Из треугольника O_1AP имеем

$$\cos z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos s, \qquad \text{(VII.10)}$$

Классификация приливных волн

где δ и s — склонение и часовой угол светила, φ — широта точки A. Подставляя (VII. 10) в (VI 1.3) и оставляя только члены второго порядка, для приливного потенциала получаем

$$\Pi = \frac{3}{4}\frac{fmR^2}{\rho^3}\left[3\left(\sin^2\delta - \frac{1}{3}\right)\left(\sin^2\varphi - \frac{1}{3}\right) + \right.$$

$$\left. + \cos s \sin 2\delta \sin 2\varphi + \cos 2s \cos^2\delta \cos^2\varphi\right]. \qquad \text{(VII.11)}$$

Три члена выражения (VII. 11) соответствуют трем типам приливных волн. Первый член, не зависящий от часового угла s, соответствует приливным волнам первого типа. Функция $\sin^2\varphi - \frac{1}{3}$ обращается в нуль на параллелях ±35° 16', которые делят поверхность Земли на зоны положительных и отрицательных значений (рис. 142, а).

Приливные волны первого типа называют зональными. Период изменения функции $\sin^2\delta - \frac{1}{3}$ равен 14 суткам для Луны и 6 месяцам для Солнца, т. е. приливные волны первого типа являются долгопериодическими.

Второй член в (VII. 11) обращается в нуль на меридиане, отстоящем от меридиана небесного тела на 90°, и на экваторе. Изменение знака приливной волны, описываемой этим членом, дано на рис. 142, б. Эти приливные волны называют тессеральными. Тессеральные волны имеют наибольшие амплитуды на широтах ±45° и нулевые — на экваторе и полюсах. В связи с периодом изменения функции cos s приливные волны второго типа являются суточными волнами.

Классификация приливных волн

Изменения третьего члена в выражении потенциала на поверхности Земли приведены на рис. 142, в. Этот член обращается в нуль на меридианах, отстоящих на 45° от меридиана небесного тела, и делит поверхность Земли на меридиональные секторы. Соответствующие третьему члену в (VII. 11) приливные волны называют векториальными. Секториальные волны являются полусуточными волнами в соответствии с изменением члена cos 2s.

Допустим, что Земля обращается вокруг Солнца по окружности с постоянной скоростью, а Луна совершает вокруг Земли равномерное круговое движение; плоскости эклиптики и орбиты Луны будем считать совпадающими с плоскостью экватора.

Приливные волны, соответствующие этим предположениям, называют главными приливными, или фундаментальными волнами. Выражение (VII. 11) при указанных предположениях будет выглядеть так:

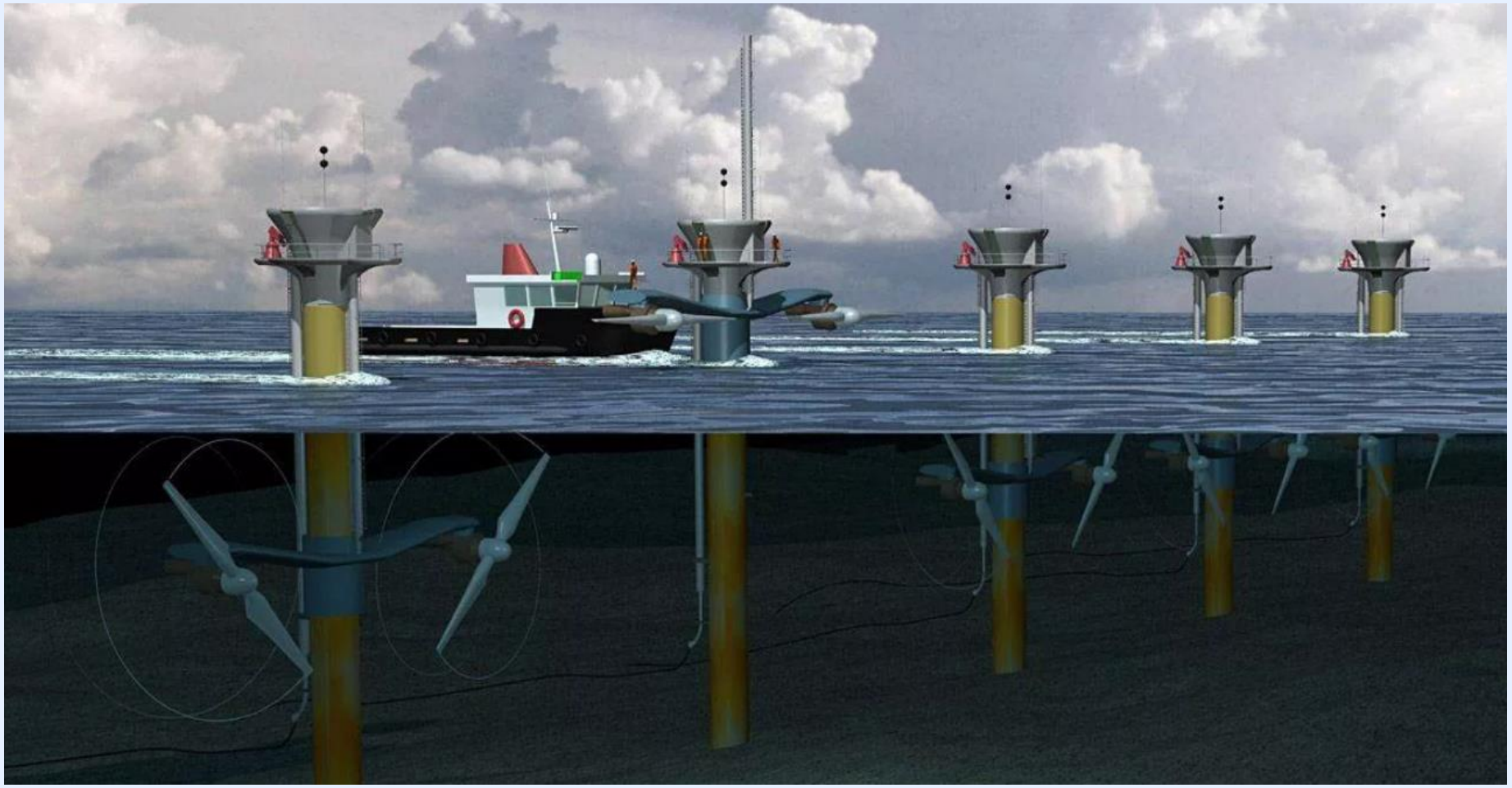
$$\Pi = -\frac{fmR^2}{4\rho^3}\left[(3\sin^2\varphi - 1) + 3\cos 2s\cos^2\varphi\right], \qquad \text{(VII.12)}$$

а для вариации силы тяжести получим

$$\delta g = -\frac{fmR}{2\rho^3}\left[(3\sin^2\varphi - 1) + 3\cos 2s\cos^2\varphi\right]. \qquad \text{(VII.13)}$$

Выражения (VII. 12) и (VII. 13) содержат два типа волн: постоянную зональную и полусуточную секториальную.

Приливная электростанция



Классификация приливных волн

Первую волну обозначают символом M_0 для Луны и S_0 для Солнца, вторую — M_2 и S_2 соответственно; причем подстрочный индекс указывает на период волны: «О» — постоянная, «2» — полусуточная, а M и S — начальные буквы слов «Луна» (moon) и «Солнце».

Заметим, что суточные тессеральные главные волны M_1 и S_1 равны нулю, так как в уравнении (VII. 11) суточный член содержит множитель $\sin 2\delta$, равный нулю при $\delta=0$.

Амплитуды фундаментальных приливных волн

		Смещение уровенной поверхности *, см	Вариации силы тяжести, мкГал
Постоянная волна	M_0	8,9	27
	S_0	4,1	13
	сумма	13,0	40
Полусуточная волна	M_2	26,7	82
	S_2	12,3	38
	сумма	39,0	120

* Смещение ζ уровенной поверхности (высота прилива) связано с потенциалом равенством $\zeta = \frac{\Pi}{g}$.

Период волны M2 равен лунным полусуткам период волны S2 — 12 часам ровно.

Классификация приливных волн

Действительные движения Земли и Луны значительно отличаются от равномерных движений по окружности. Особенно сложно движение Луны, орбита которой испытывает значительные возмущения от Солнца.

Часовой угол s и склонение δ Луны и Солнца непрерывно изменяются. Поэтому наряду с главными приливными волнами существуют волны, вызванные отличиями в движении истинной Луны и Земли от принятых при определении главных волн.

Долгопериодические зональные волны являются стоячими волнами, периодически изменяющими сжатие Земля. Периоды этих волн зависят от длины тропического года, тропического месяца, периодов обращения перигелия лунной орбиты (около 9 лет), узла лунной орбиты (около 18,6 лет), перигелия земной орбиты (около 21 000 лет). Амплитуда наибольшей долгопериодической волны — лунной двухнедельной волны Mf, вызванной изменением склонения Луны, достигает 9 см на экваторе и 18 см на полюсе (см. рис. 142, а).

Суточные тессеральные волны являются упругими волнами с периодами 21,6—29,3 часа. Эти волны имеют максимальные амплитуды на широтах ±45°, минимальные (нулевые) — на экваторе и на полюсах. Фазы таких волн противоположны на долготах, отличающихся на 180°, и для одной и той же широты в северном и южном полушариях (см. рис. 142, б).

Полусуточные секториальные волны также относятся к упругим бегущим волнам. Эти волны симметричны относительно экватора. Они имеют максимальную амплитуду на экваторе и нулевую на полюсах.

Классификация приливных волн

Под влиянием этих волн Земля принимает форму трехосного эллипсоида, причем приливная деформация от полусуточных волн, так же как и от суточных, перемещается внутри Земли с востока на запад. Основной полусуточной волной (кроме главных волн M2 и S2) является волна N2, вызванная эллиптичностью лунной орбиты.

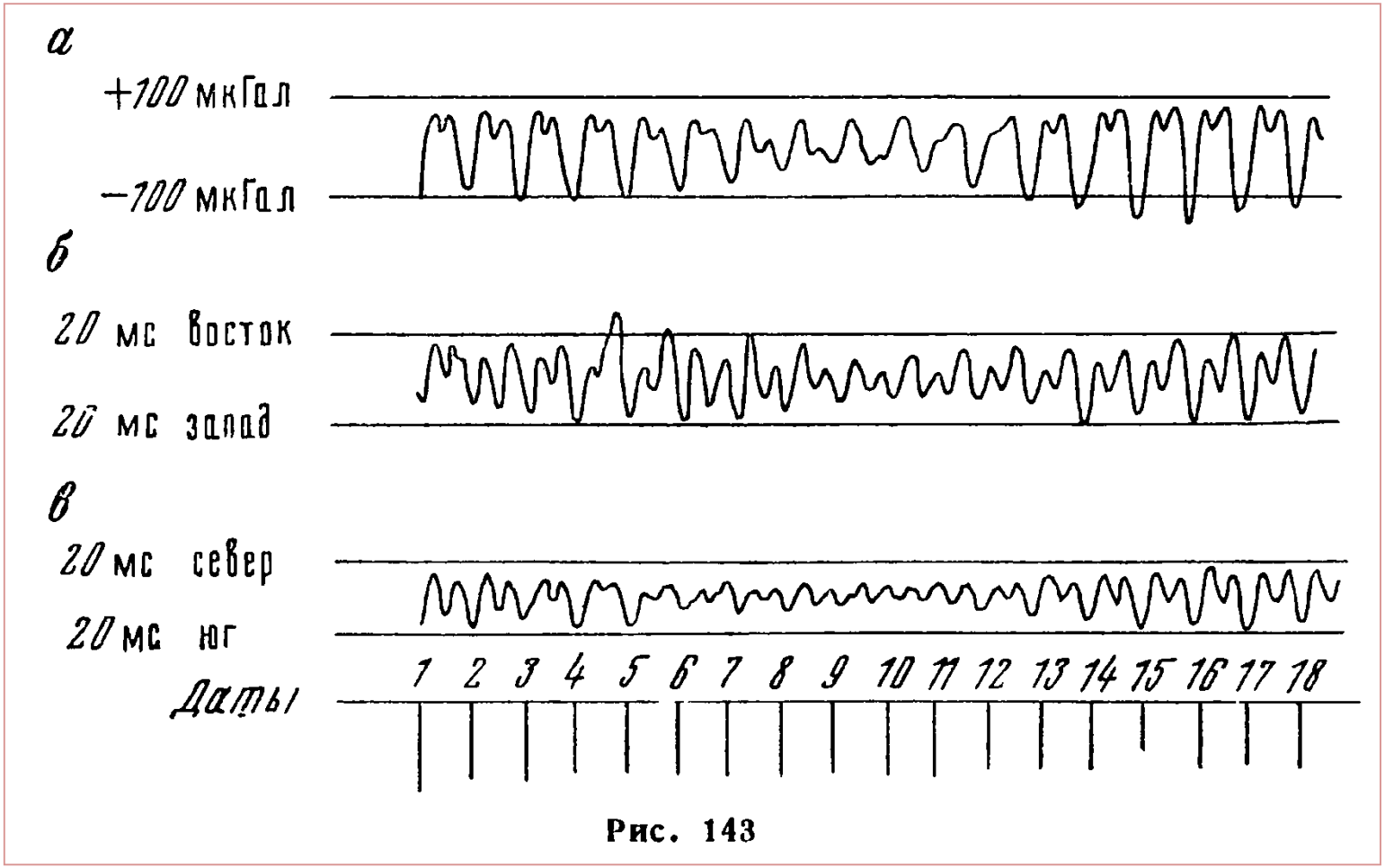


Рис. 143

Классификация приливных волн

При наблюдениях приливных изменений гравитационного поля регистрируется истинный суммарный прилив. Изучение приливов основано, главным образом, на измерениях вариаций силы тяжести («гравиметрический прилив») и наклонов уровенной поверхности («наклономерный прилив»).

На рис. 143 показан фрагмент одновременной регистрации приливных изменений силы тяжести (рис. 143, а) и наклонов в направлениях меридиана (рис. 143, б) и первого вертикала (143, в).

Используя подобные записи, из наблюденных приливов выделяют волны разных типов. Такое разделение выполняют на основании методов гармонического анализа измеренных ординат приливных кривых. Причем для выделения суточных и полусуточных волн достаточно месячной серии наблюдений, а долгопериодические волны можно найти только из длительных рядов измерений (в течение года и более). На технике выполнения гармонического анализа останавливаться не будем.

В результате этого анализа находят амплитуды и фазы приливных волн в средний момент использованного ряда измерений.

Отношение S амплитуд наблюдаемых гравиметрических приливных волн к теоретическим амплитудам для абсолютно твердой Земли согласно (VI 1.8) равно

$$\delta = 1 + h_2 - \frac{3}{2} k_2,$$

Классификация приливных волн

а отношение у наблюдаемых наклонов $\delta\overline{\vartheta_1}$ к теоретическим наклонам $\delta\vartheta$ на основании (VI 1.9, а) имеет вид:

$$\gamma = 1 + k_2 - h_2.$$

Таким образом, зная отношение амплитуд гравиметрических и наклономерных приливов, можно вычислить числа Лява, которые, как отмечалось ранее, связаны с физическими свойствами Земли.





Поправка за приливные изменения силы тяжести в результаты гравиметрических наблюдений

В результаты гравиметрических наблюдений принято вводить поправку, после учета которой исключается притяжение Луны и Солнца, а измеренная сила тяжести относится к поверхности Земли, недеформированной приливами.

Для вычисления приливной поправки gn с точностью порядка 10 мкГал можно использовать приближенную формулу

$$g_{\text{п}} = 1{,}2\,\frac{fmR}{\rho^3}\,(3\cos^2 z - 1), \qquad \text{(VII.14)}$$

которая получается из (VI 1.5) после замены знака и учета увеличения приливных вариаций из-за деформации Земли. Эта поправка прибавляется к измеренному значению силы тяжести

$$g = g_{\text{изм}} + g_{\text{п}}.$$

Используя численные значения (VII.7), для совместного влияния Луны и Солнца получаем

$$g_{\text{п}} = 1{,}2R\left[\left(\frac{fm}{\rho^3}\right)_{\text{☾}}(3\cos^2 z_{\text{☾}} - 1) + \left(\frac{fm}{\rho^3}\right)_{\odot}(3\cos^2 z_{\odot} - 1)\right] =$$

$$= \left[55\,(3\cos^2 z_{\text{☾}} - 1) + 25\,(3\cos^2 z_{\odot} - 1)\right] \text{мк Гал.} \qquad \text{(VII.15)}$$

При относительных определениях силы тяжести к величине поправки, вычисленной по (VII. 15), прибавляют постоянное число (например, 0,3 мГал), чтобы поправка за приливные изменения силы тяжести была всегда положительной.

Поправка за приливные изменения силы тяжести в результаты гравиметрических наблюдений

Для величины gn+0,3 мГал составляют графики на каждый день и час наблюдений. Образец такого графика дан на рис. 144, где приведены значения поправок для трех разных широт — 30°, 50°, 70°.

Для промежуточных широт поправка определяется интерполированием. На рис. 144 видно, что амплитуда поправки убывает с увеличением широты.

Согласно графику изменение поправки за время шестичасового рейса может составить 0,2 мГал на широте 30°.

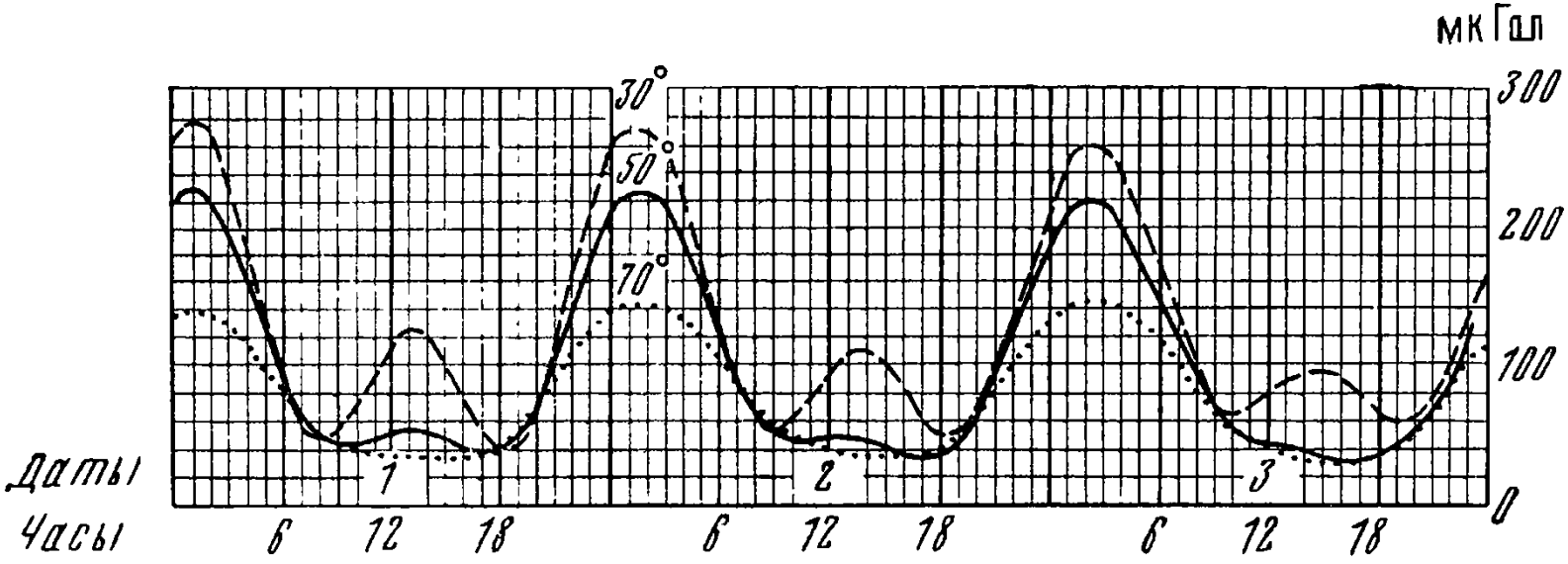


Рис. 144

Наблюдения приливных изменений силы тяжести и наклонов уровенной поверхности

Измерение приливных изменений силы тяжести имеет большее значение. Это связано не только с определением чисел Лява и изучением внутреннего строения и упругих свойств Земли.

Точные значения приливных изменений силы тяжести необходимо знать для учета приливных поправок при создании опорных гравиметрических сетей и абсолютных определениях.

Особенно важно иметь эти поправки при изучении неприливных изменений силы тяжести.

Наблюдения приливных изменений силы тяжести выполняют на постоянных и временных приливных станциях с помощью статических гравиметров.

В СНГ приливные наблюдения постоянно ведутся в Алма-Ате, Новосибирске, Красной Пахре, Полтаве и других пунктах.

Наблюдения приливных изменений силы тяжести и наклонов уровенной поверхности

Для регистрации приливных изменений с.т. используют преимущественно гравиметры «Аскания» GS-12, GS-11 и GS-15 и гравиметр «Ла Косте-Ромберга»; имеется опыт применения для этой цели сверхпроводящего гравиметра.

В гравиметрах последних моделей, сконструированных для измерения приливных изменений силы тяжести, имеется специальное электромагнитное устройство для калибровки записи, состоящее из двух магнитов, укрепленных на маятнике, и двух катушек Гельмгольца.
Для измерения температуры внутри гравиметра помещается датчик термографа сопротивлений с чувствительностью 0,001° С.

Приборы снабжают уровнями точности 5—10". Точность регистрации гравиметрических приливов составляет около 1 мкГал.

Пэнжинская ПЭС



Полезные ссылки

- Кузьмин, В.И. Гравиметрия [Текст]: учеб. пособие / В.И. Кузьмин. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 193 с.
- Гравиметрия : учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-56 01 02 «Геодезия»/сост. и общ. ред. Г. А. Шароглазовой. – Новополоцк : ПГУ, 2006 – 196 с.
- https://youtu.be/5yAXukvfrIU Приливы и отливы Луна невызывает?
- https://fb.ru/article/385430/penjinskaya-pes-sostoyanie-proekta-i-perspektivyi Пэнжинская ПЭС