

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.244 : 550.312

И. В. КАЛАШНИКОВА

**О СВЯЗИ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ
С ГРАВИТАЦИОННЫМ ПОЛЕМ**

Современные вертикальные движения земной коры изучаются уже несколько десятков лет, но причины их возникновения еще недостаточно выяснены. В решении этой задачи может помочь анализ взаимоотношений вертикальных движений с геофизическими полями. В частности, интересно сопоставить вертикальные движения с полем изостатических аномалий.

Первыми работами, посвященными этой проблеме, были работы В. А. Магницкого (1948, 1953, 1965), Е. Н. Люстиха (1948), Е. Н. Люстиха, В. А. Магницкого (1963). В них рассматриваются причины вертикальных движений (не только современных) и их связь с гравитационным полем Земли.

Возможны два основных типа процессов, вызывающих вертикальные движения. Первый предполагает сжатие или расширение глубинного материала, не ведущее к изменению общей массы. В этом случае не наблюдается изменения изостатических аномалий (Магницкий, 1948, 1953, 1965). Второй тип предполагает перемещение глубинного материала в горизонтальном направлении. Рассматривая этот процесс схематично, можно считать, что поднятию будет соответствовать увеличение изостатических аномалий (приток глубинного материала), а опусканию — уменьшение их (отток глубинного материала) (Люстих, 1948; Люстих, Магницкий, 1963).

Возможен третий тип процессов, ведущих к вертикальным движениям, при рассмотрении которого мы исходим из следующих соображений. Известно, что в тонком слое вещества верхней мантии резко снижается вязкость (Магницкий, 1965; Артюшков, 1966, 1967). Этот слой можно отождествить с астеносферой. Глубина подошвы астеносферы превосходит 200—300 км, а ее средняя вязкость оценивается в 10^{20} — 10^{21} нз. Над астеносферой и под ней находится значительно более вязкий слой. Приближенно можно считать астеносферу жидким слоем, заключенным между слоями твердого вещества.

Представим следующий процесс. Пусть в слое под астеносферой произойдет расширение (или сжатие) вещества, внедрение его в астеносферу и, следовательно, поднятие (или опускание) верхней границы астеносферы, которое и приведет к вертикальным движениям земной коры. Поскольку вещество астеносферы менее вязкое, чем снизу и сверхунее, то верхняя граница астеносферы поднимется меньше нижней вследствие оттока вещества в стороны. Таким образом, в случае расширения вещества под астеносферой и поднятия ее верхней грани-

цы приведет отток вязкого вещества и, следовательно, уменьшение силы тяжести. Итак, третий тип процессов, которые могут вызывать вертикальные движения, предполагает в случае поднятия уменьшение изостатических аномалий, а в случае опускания — увеличение их (за счёт подтока вещества).

Попытаемся дать приближенную количественную оценку такому процессу. Воспользуемся работой Е. В. Артюшкова (1967), в которой решается задача о возмущении жидкости толщиной H , ограниченной снизу жесткой стенкой. Используем соотношение:

$$\frac{d\xi}{dt} = C \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \xi, \quad (1)$$

где ξ — возмущение верхней границы слоя.

$$C = \frac{\rho g H^3}{12 \eta_0}, \quad (2)$$

где H — толщина слоя, η_0 — средняя вязкость жидкости, ρ — плотность жидкости.

Эта формула дает нам изменение возмущения верхней границы во времени, т. е. при задании возмущения в виде поднятия $\frac{d\xi}{dt}$ дает нам скорость опускания (расплывания) поднятия.

Описанный выше третий возможный тип процессов, вызывающих вертикальные движения, можно схематично представить так. Поднятие под астеносферой вызовет возмущение ξ ее верхней границы, которая, предоставленная самой себе, будет опускаться (Артюшков, 1967); в поднятой области верхней границы будет происходить оплывание материала. Это фактически и есть описанный выше процесс оттока материала в стороны, который приведет к уменьшению гравитационного поля.

В настоящей работе исследуются современные движения земной коры, скорость которых известна из геодезических измерений. В случае осуществления третьего типа процессов скорость современных движений (в приближенной оценке) складывается из скорости движения возмущения ξ и скорости движения нижней границы астеносферы. Отсюда можно оценить скорость перемещения нижней границы: она должна обеспечить современные скорости вертикальных движений и компенсировать скорость опускания возмущенной верхней границы $\frac{d\xi}{dt}$,

т. е. скорость нижней границы равна скорости современного движения минус $\frac{d\xi}{dt}$ (в случае поднятия $\frac{d\xi}{dt}$ имеет отрицательный знак).

Для оценки $\frac{d\xi}{dt}$ зададим начальное возмущение ξ в виде поверхности шарового сегмента:

$$x^2 + y^2 + (\xi + a)_2 = R^2;$$

где R — радиус соответствующего шара; a — расстояние от центра шара до поверхности невозмущенного уровня; x и y — прямоугольные координаты в горизонтальной плоскости. Вычислим $\frac{d\xi}{dt}$ в начале координат, т. е. в точке, соответствующей наивысшему подъему. Из уравнения (1)

$$\frac{d\xi}{dt}(0, 0) = -\frac{2C}{R}.$$

Если задать шаровой сегмент с диаметром основания $2b$ и высотой h , то

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{4Ch}{b^2 + h^2}. \quad (3)$$

Для вычисления коэффициента C по формуле (2) берутся наиболее употребляемые значения ρ , η и H (толщина слоя астеноафера): $H=200$ км; $\rho=3,4$ г/см³; $\eta=10^{20}$ пз. Для задания размеров шарового сегмента используем обычную высоту платформенных областей $h \approx 100-200$ м; горизонтальные размеры примем $2b \approx 1000$ км. Так как $h \ll b$, то $\frac{d\xi}{dt} = -\frac{4Ch}{b^2}$. Подставляя перечисленные величины, получим

$\left| \frac{d\xi}{dt} \right| \approx 10-20$ см/год (в случае поднятия $\frac{d\xi}{dt}$ имеет отрицательный знак). Итак, при скоростях движений на платформах 0,5—1 см/год скорость нижней границы равна $\approx 11-21$ см/год, т. е. на порядок больше, чем скорость движений на поверхности.

Оценим теперь гравитационный эффект, вызываемый этим процессом. За определенный промежуток времени верхняя граница астеноаферы поднимается на высоту h_1 , а нижняя на высоту h_2 . Тогда изменение гравитационного поля $\delta g = 2\pi G\rho(h_1 - h_2)$, где ρ — плотность астеноаферы. Пусть скорость движения верхней границы 5 мм/год (средняя скорость современных движений на платформах), тогда за 2000 лет (известно, что современные движения сохраняют свой знак в течение нескольких тысяч лет) h_1 достигнет величины 10 м. За это же время нижняя граница, скорость движения которой на порядок больше, поднимается на высоту $h_2=100$ м. В этом случае $\delta g \approx -13$ мгл.

Итак, при осуществлении третьего типа процессов, вызывающих вертикальные движения, можно ожидать при поднятиях со скоростью 0,5—1 см/год уменьшения силы тяжести в течение нескольких тысяч лет на несколько десятков мгл.

Для проверки перечисленных трех гипотез, которые могут объяснить современные движения, обратимся к фактическому материалу. В данной работе сравнивались современные вертикальные движения и гравитационное поле для западной части СССР. Для каждого из полей проведена частотная фильтрация. В качестве исходных данных использовали карту скоростей современных движений земной коры (Матцкова, 1963) и данные по изостатическим аномалиям силы тяжести, полученные в Институте физики Земли АН СССР М. Е. Артемьевым.

Фильтрация проводилась из следующих соображений. Пусть на плоскости задано поле $F(x, y)$, $f(u, v)$ спектр функции $F(x, y)$:

$$f(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) e^{-i(ux+vy)} dx dy.$$

Мы хотим построить новое поле $F^*(x, y)$ так, чтобы его спектр $f^*(u, v)$ совпадал с $f(u, v)$ в заданном диапазоне частот

$$\omega < u < \Omega,$$

$$\omega < v < \Omega$$

и был бы равен нулю вне этой области. Существует способ приближенного построения $F^*(x, y)$ с помощью простой операции осреднения (Гладкий, 1967).

Построим функцию $F_l(x, y)$ следующим образом. Возьмем квадрат с центром в точке (x, y) и стороной $2l$, и положим $F_l(x, y)$ рав-

ной среднему значению $F(x, y)$ в этом квадрате.

$$F_l(x, y) = \frac{1}{4l^2} \int_{-l}^l \int_{-l}^l F(x - \xi; y - \eta) d\xi d\eta.$$

Зададим функцию $H_l(x, y)$ следующим образом:

$$H_l(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{если } -l \leq x \leq l \\ 0 & \text{если } -l \leq y \leq l \end{cases}$$

$$H_l(x, y) = 0 \text{ вне этого квадрата.}$$

Тогда $F_l(x, y)$ есть свертка функции $F(x, y)$ с $H_l(x, y)$:

$$F_l = F \times H_l; \quad \left[F_l(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) H_l(x - \xi; y - \eta) d\xi d\eta \right].$$

Для соответствующих спектров имеет место равенство:

$$f_l(u, v) = f(u, v) h_l(u, v).$$

Вычислим $h_l(u, v)$:

$$\begin{aligned} h_l(u, v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_l(x, y) e^{-i(ux+vy)} dx dy = \frac{1}{4l^2} \int_{-l}^l \int_{-l}^l e^{-i(ux+vy)} dx dy = \\ &= \frac{\sin ul}{ul} + \frac{\sin vl}{vl}. \end{aligned}$$

Пусть мы теперь хотим «срезать» частоты выше ω . Выберем так, чтобы $\omega l = \pi$. Тогда $\frac{\sin \omega l}{\omega l} = 0$ и функция $F_l(x, y)$ дает поле, у которого частоты выше ω практически срезаны. Аналогично находим L из равенства $\Omega L = \pi$.

Строим функцию $F_L(x, y)$, которая срезает частоты выше Ω . Искомое поле $F^*(x, y)$ дается равенством:

$$F^*(x, y) = F_L(x, y) - F_l(x, y).$$

Частоте ω соответствует длина волны $\lambda = \frac{2\pi}{\omega}$, значит $l = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\lambda}{2}$.

Таким образом, сторона квадрата осреднения равна $2l = \lambda$. Диапазон длин волн, которые останутся после погашения ненужных, задается из следующих соображений. Из работ В. А. Магницкого (1965) и И. В. Калашниковой (1968), в которых графики скоростей вертикальных движений подверглись граммническому анализу, следует, что длины волн меньше 120 км плохо выражены, а для выявления длин волн > 500 км существующего материала явно недостаточно. В этом диапазоне длин волн мы и будем рассматривать наши поля. Стороны квадратов осреднений соответственно будут равны 120 и 500 км.

Вначале сделали попытку провести такую фильтрацию, чтобы погасились все длины волн меньше 120 км. Проведя затем фильтрацию с остаточными длинами волн до 500 км, мы могли бы получить длины волн в диапазоне от 120 до 500 км. Такое остаточное поле получается простым вычитанием из отфильтрованного поля с длиной волны больше 120 км поля с длиной волны больше 500 км.

К сожалению, данные о вертикальных движениях носят довольно скучный характер, поэтому простое сопоставление исходного поля с отфильтрованным с длинами волн до 120 км, показывает, что картина фактически не меняется. Пришлось отказаться от идеи выделить какой-то средний интервал длин волн.

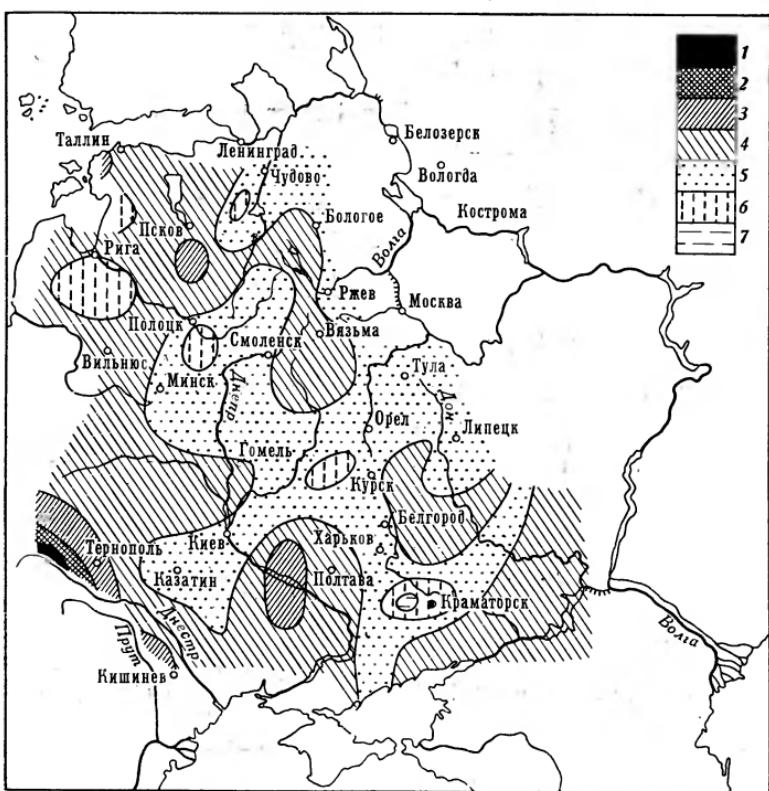


Рис. 1. Схема скоростей вертикальных движений земной коры на Русской равнине (после фильтрации).

Обозначения скоростей в мм/год:
 1 — >8 ; 2 — от +6 до +8; 3 — от +4 до +6; 4 — от 0 до +2; 5 — от -2 до -4;
 6 — от -4 до -6; 7 — <-6

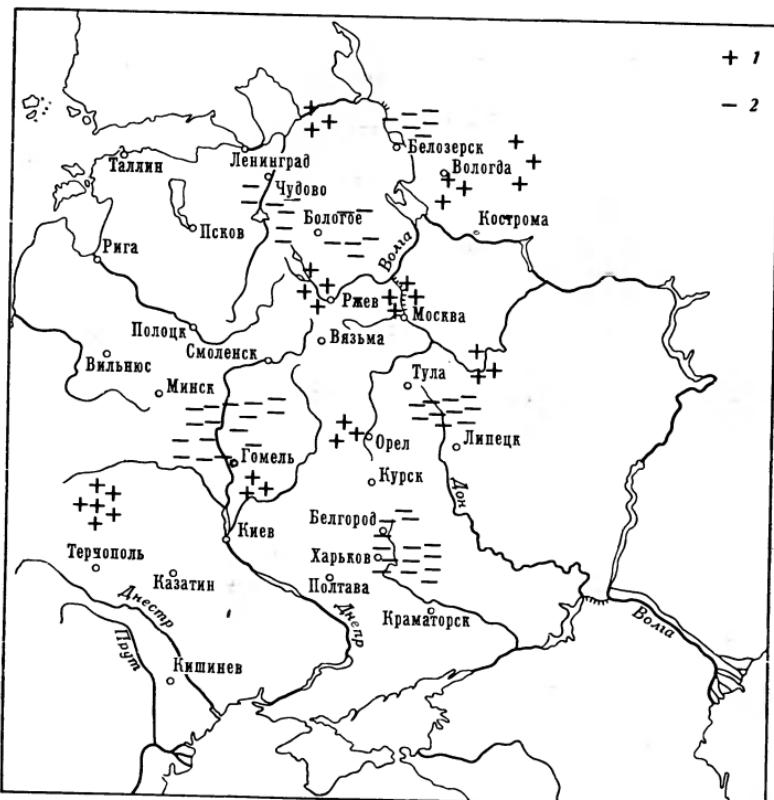


Рис. 2. Схема изостатических аномалий Русской равнины (после фильтрации).

Плюсы — сильные положительные аномалии; минусы — сильные отрицательные аномалии

Используем первоначальное после вертикальных движений. Всю площадь разбиваем на квадраты; с помощью линейной интерполяции находим значения скоростей движения в середине квадрата, затем производим фильтрацию длин волн меньше 500 км, исходя из описанных выше соображений, т. е. вычисляем среднее значение скоростей для квадратов со стороной 500 км таким образом, чтобы это среднее приходилось на ту точку квадрата, чье интерполированное значение нам уже известно. Разность между этими двумя полями и даст нам поле, в котором останутся длины волн до 500 км. Такую же операцию проведем с полем изостатических аномалий.

Естествен вопрос, для чего нужна фильтрация, почему при сопоставлении отфильтрованных полей можно получить какую-то дополнительную информацию по сравнению с исходными полями. Вполне возможно, что фильтрация устраняет некоторые местные, индивидуальные особенности картин поля и выявляет особенности и схожесть полей, скрытые раньше. В итоге получены две карты с отфильтрованными полями, в которых присутствуют длины волн до 500 км,— карты изостатических аномалий и современных вертикальных движений. На рис. 1 приведена карта отфильтрованного поля вертикальных движений. На рис. 2 схематически указаны сильные положительные и отрицательные изостатические аномалии полей фильтрации.

При сопоставлении полученных карт сделан следующий вывод: наиболее ярко выраженные максимумы поднятий или опусканий соответствуют близким к нулевым изостатическим аномалиям. Примерами могут служить поднятия в районах Вязьмы — Смоленска, Опочки, по р. Великой. Интенсивным опусканиям к югу от Полоцка, в районе Киева — Казатина, Краматорска также соответствуют области нулевых аномалий.

Иключение составляют район г. Тернополя, где оба остаточных поля имеют максимумы, а также район г. Дно-Чудова и оз. Волхова, южнее Ленинграда, где в обоих полях наблюдаются сильные минимумы. Поведение этой области можно связать с недавним уходом ледника, при котором происходит изостатическое движение. Если это так, то к югу от Ленинграда осуществляется второй тип процессов, который предполагает приток или отток глубинного материала со стороны.

В целом на платформенных областях западной части СССР большая часть хорошо выраженных поднятий и опусканий развивается вне выраженной связи с основными гравитационными аномалиями. Можно заключить, что в рассмотренной области осуществляется преимущественно первый тип процессов, вызывающих вертикальные движения, то есть сжатие или расширение глубинного материала. На некоторых участках, возможно, имеет место второй тип процессов (приток или отток глубинного материала). Третий тип процессов, описанный в этой статье, на данной территории наблюдать не удалось.

ЛИТЕРАТУРА

- Артюшков Е. В. О характере изменения с глубиной вязкости верхней мантии.— Изв. АН СССР. Физика Земли, № 8, 1966.
Артюшков Е. В. Об установлении изостатического равновесия земной коры.— Изв. АН СССР. Физика Земли, № 1, 1967.
Гладкий К. В. Гравиразведка и магниторазведка. «Недра», 1967.
Калашников А. И. В. Метод разложения в интеграл Фурье современных вертикальных движений и сопоставление спектров для различных технических областей.— В сб.: Современные движения земной коры, № 3, «Наука», 1968.
Люстик Е. Н. Гравиметрический метод изучения причин колебательных движений земной коры.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., № 16, 1948.
Люстик Е. Н., Магницкий В. А. Вертикальные движения земной коры, изменения гравитационного поля во времени и перемещение подкоровых масс.— В сб.: Современные движения земной коры, т. 1. Изд-во АН СССР, 1963.

Магницкий В. А. О возможном характере деформаций в глубоких слоях земной коры и подкоровом слое.— Бюл. МОИП, отдел геол., № 2, 1948.

Магницкий В. А. Основы физики земли. Геодезиздат, 1953.

Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. «Недра», 1965.

Магницкий В. А. Физическая природа некоторых типов вертикальных движений земной коры.— В сб.: Современные движения земной коры, № 2, Тарту, 1965.

Матцкова В. А. Уточненная карта скорости современных движений земной коры на западе Европейской части СССР и некоторые соображения о периоде этих движений.— В сб.: Современные движения земной коры, № 1, М., 1963.

Институт физики Земли
АН СССР

Поступила в редакцию
12.XII.1969

ON THE CONNECTION OF RECENT VERTICAL MOVEMENTS WITH THE GRAVITATIONAL FIELD

I. V. KALASHNIKOVA

Summary

Recent vertical movements of the European part of the USSR are compared with the isostatic anomalies; a frequency filtration of the fields of vertical movements and anomalies of gravity has been carried out. The majority of well pronounced uplifts and subsidences do not indicate their connection with gravitational anomalies. The author comes to the conclusion that vertical movements were mainly caused by a compression or expansion of intrusive matter.

УДК 551.4 : 551.24(571.651)

Я. А. ДРАНОВСКИЙ

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ НИЖНЕ-АНАДЫРСКОЙ ВПАДИНЫ

Нижне-Анадырская впадина является одним из наиболее перспективных на нефть и газ районов Северо-Востока СССР. Не случайно эта впадина была выбрана как первоочередной объект глубокого бурения.

С 1960 г. началось систематическое изучение геологического строения впадины. В первые годы осваивались доступные для исследования горные хребты Пекульней, Рарыткан и северо-восточная часть Корякского нагорья, составляющие складчатое обрамление впадины. Сама впадина, полностью закрытая мощной толщей рыхлых плейстоценовых отложений, привлекала внимание лишь геофизиков, осуществивших на ее территории региональные и детальные аэромагнитные, гравиметрические и сейсмические исследования.

С 1962 г. нами предпринимались попытки использования морфоструктурного анализа для выявления пликативных и разрывных структур, выраженных на поверхности впадины. На нескольких эталонных участках в краевой зоне впадины, где степень обнаженности позволяла изучать геологическое строение в полевой обстановке, и в районах детальных геофизических работ было опробовано свыше полутора десятков геоморфологических методов. Наиболее эффективные из них послужили рабочей основой для морфоструктурного анализа всей территории впадины.