# Датчики давления, установленные на аэростатах как альтернатива сейсмометрам на поверхности Венеры

**Батов А.В.[1],[2] Гудкова Т.В.[1] Степанова И.Э.[1]**

[1] Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Большая Грузинская ул., 10
gudkova@ifz.ru, tet@ifz.ru

[2] Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, ул. Профсоюзная, 65
batov@ipu.ru

# Зачем измерять давление в атмосфере Венеры

Имеющиеся наблюдения слабо ограничивают модели внутреннего строения Венеры. Они различаются по толщине коры и мантии, а также по размеру ядра.

Сейсмические наблюдения на поверхности затрудняют высокая температура (около 750 К) и давление (около 93 атм).

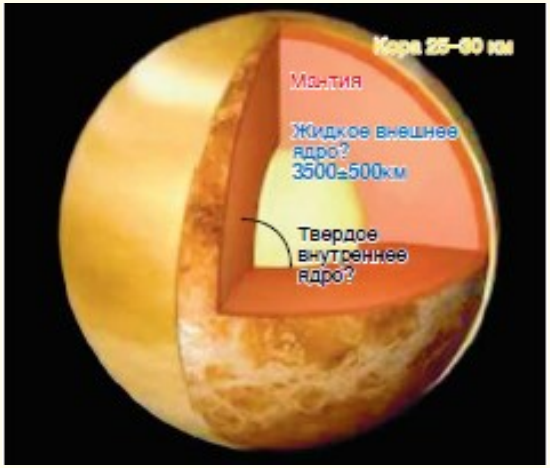



Схема внутреннего строения Венеры

Возмущения от сейсмических волн предлагают регистрировать в атмосфере и ионосфере с орбитальных аппаратов, а инфразвук в атмосфере — датчиками давления на аэростатах [1–3]. Возможность аэростатной регистрации изучают на Земле. Например, по записям четырёх аэростатов удалось оценить положение источника землетрясения и скорости сейсмических волн [8].

В этой работе мы проверяем, можно ли методом линейных интегральных представлений [4–6] восстановить эквивалентные источники сейсмического события в недрах Венеры по синтетическим амплитудам возмущений давления.

# Модель связи поверхности и атмосферы

В локальной постановке Венеру представляем как два вертикально неоднородных полупространства: недра и атмосферу. Плоская граница между ними позволяет вести расчёт в декартовых координатах.

Источник в недрах возбуждает сейсмическую волну, которая распространяется вдоль поверхности. Вертикальные колебания поверхности порождают восходящую акустическую волну в атмосфере.




В этой модели амплитуда регистрируемого инфразвукового сигнала связана с амплитудой вертикальной скорости поверхности под датчиком.

# Как построен синтетический сигнал

Для проверки метода использованы данные о косейсмических смещениях земной коры на северо-восточной окраине Евразии, вызванных землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. [7]. Исходный набор включает 160 точек в пределах 23–54° с. ш. и 97–153° в. д.

В расчёте пренебрегаем затуханием акустической волны. По оценкам [1], инфразвук, возбуждаемый сейсмическими волнами на частотах ниже 1 Гц, затухает слабо. Амплитуду возмущения давления, вызванного вертикальным движением поверхности, вычисляем по формуле [1].

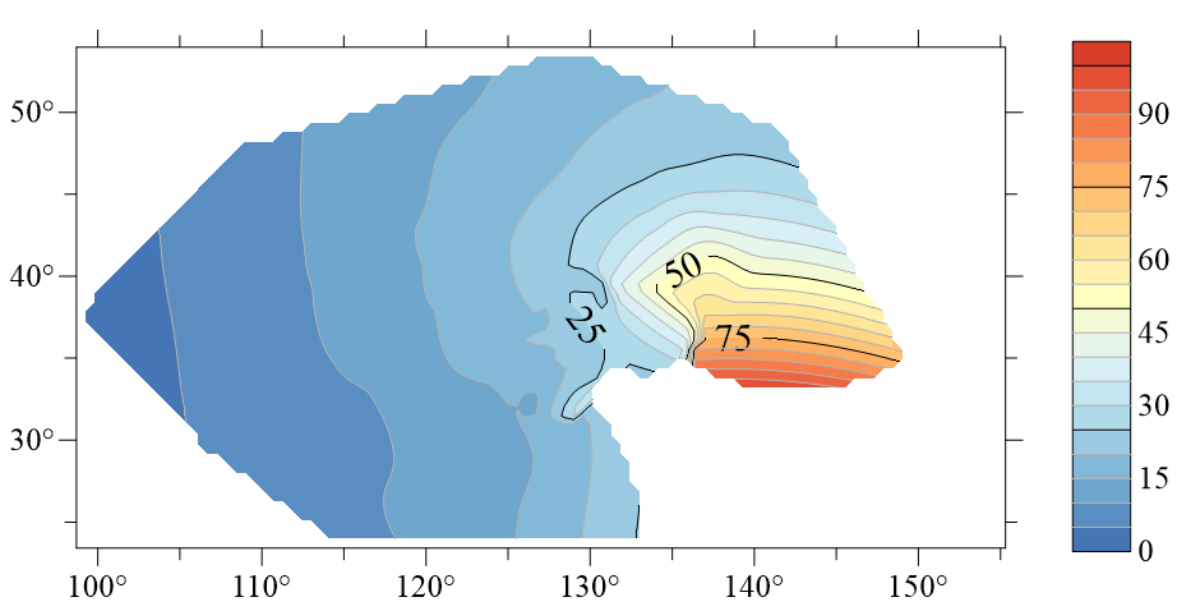
$$DP = \rho(z_b)c(z_b)\sqrt{\frac{\rho(0)}{\rho(z_b)}}\left(\frac{2\pi 10^{-6} A_d}{T_s}\right),$$

$DP$ — амплитуда возмущения давления, Па. $A_d$ — амплитуда вертикального смещения поверхности, мкм. $T_s$ — период колебаний, с. $\rho$ и $c$ — плотность атмосферы и скорость звука. Высота аэростата обозначена $z_b$, а поверхность соответствует $z = 0$.

# Синтетическое поле на высоте 50 км

Моделируем амплитуды возмущений давления для периода 10 с. Плотность атмосферы у поверхности и на высоте 50 км принимаем равной 65 и 1,3 кг/м³ соответственно, скорость звука — 426 и 310 м/с.

Из-за высокой температуры поверхности хрупко-вязкий переход в коре ожидается на меньших глубинах. В расчёте предполагаем, что толщина сейсмогенного слоя не превышает 30 км, и рассматриваем мелкофокусные источники на глубинах 5–30 км.

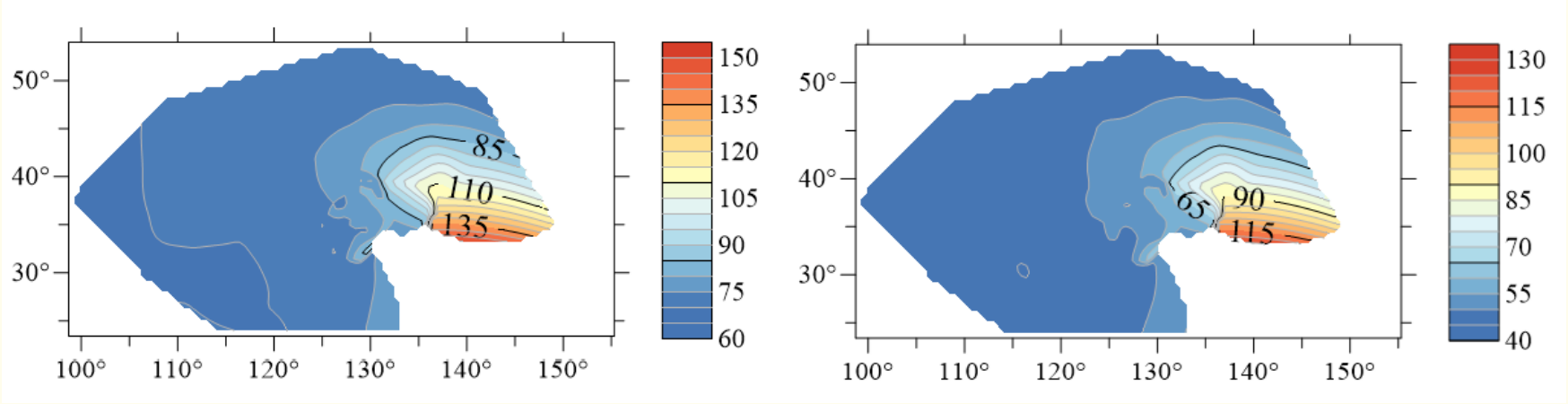



Амплитуды возмущений давления, Па. По осям — координаты исходной земной сетки, °.

# Эквивалентные источники и продолжение поля

По синтетическому полю амплитуд на высоте 50 км восстанавливаем распределение эквивалентных источников в диапазоне глубин 10–30 км. Затем аналитически продолжаем поле вниз, на высоту 5 км и на поверхность Венеры. На картах показан пример расчёта при глубине источника 20 км.

**Поверхность Венеры** **Высота 5 км**



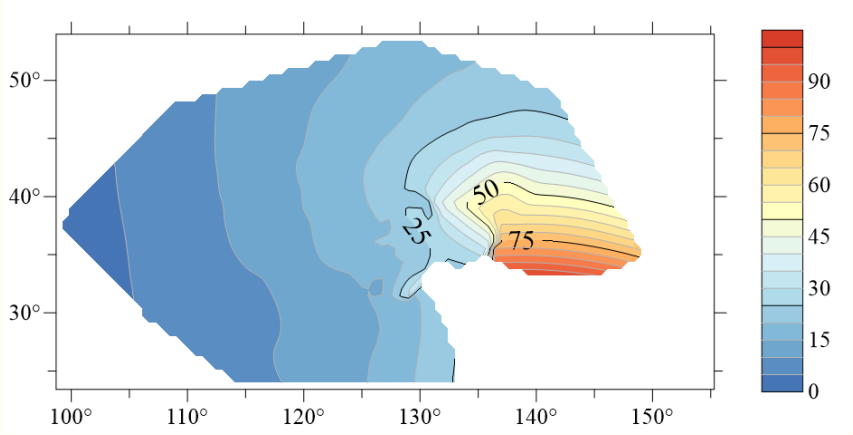

Амплитуды возмущений давления, Па. Цветовые шкалы на двух картах различаются.

Для аппроксимации поля используем стационарную S-аппроксимацию. Относительная невязка на наборе из 160 точек составила $1{,}3 \times 10^{-8}$. По полю давления на поверхности заново подбираем эквивалентные источники для продолжения поля вверх.

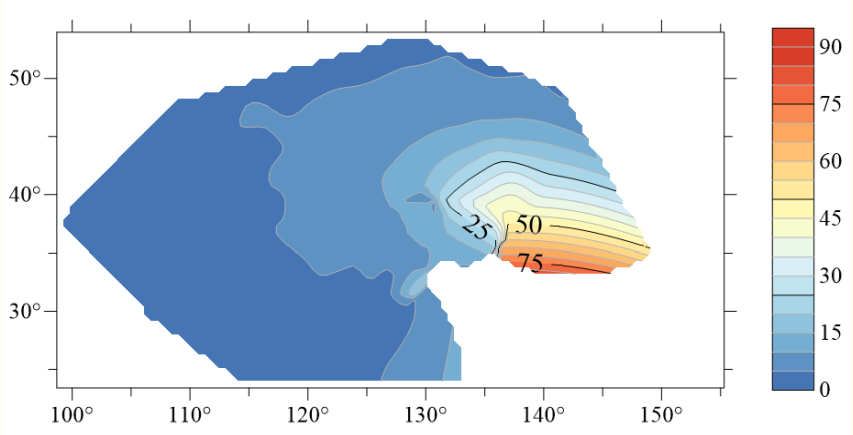
# Проверка восстановления поля на высоте 50 км

По полю на поверхности Венеры определяем новое распределение эквивалентных источников и аналитически продолжаем поле вверх на 50 км. Сравниваем результат с исходным синтетическим полем на той же высоте.

### Исходное синтетическое поле




### Поле после продолжения вверх




Амплитуды возмущений давления, Па. На обеих картах показана высота 50 км.

**10–15 %** Относительная погрешность восстановления исходного поля после продолжения вниз и обратно на высоту 50 км.

# Выводы

В локальной постановке метод линейных интегральных представлений позволяет по синтетическим амплитудам возмущений давления в атмосфере Венеры подобрать распределение эквивалентных источников сейсмического сигнала в её недрах.

В эксперименте с 160 точками относительная невязка S-аппроксимации составила $1{,}3 \times 10^{-8}$. Аналитическое продолжение на поверхность и обратно на высоту 50 км восстановило исходное поле с относительной погрешностью 10–15 %.

Без надёжных априорных сведений о геометрии и глубине источников обратная задача допускает несколько решений. В эксперименте подбирается одно из распределений, эквивалентных по внешнему полю давления. Полученные оценки относятся к синтетическим данным.

*Работа выполнена за счёт темы госзадания ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН.*

# Литература


[1] Garcia R.F., van Zelst I., Kawamura T. et al. Seismic wave detectability on Venus using ground deformation sensors, infrasound sensors on balloons and airglow imagers. Earth and Space Science, 2024, 11, e2024EA003670.

[2] Brissaud Q., Kong C., Froment M. et al. Aerial and space-borne seismology on Venus: Viability and design implications for future missions. Earth and Space Science, 2026, 13, e2025EA004541.

[3] Krishnamoorthy S., Bowman D.C. A ‘floatilla’ of airborne seismometers for Venus. Geophysical Research Letters, 2023, 50 (2), e2022GL100978.

[4] Strakhov V.N., Stepanova I.E. The S-approximation method and its application to gravity problems. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2002, 38 (2), 91–107.

[5] Раевский Д.Н., Степанова И.Э. О решении обратных задач гравиметрии с помощью модифицированного метода S-аппроксимаций. Физика Земли, 2015, № 2, с. 44–54.

[6] Stepanova I.E., Kolotov I.I., Yagola A.G. et al. On the uniqueness of discrete gravity and magnetic potentials. Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2025, 65, 603–617.

[7] Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Кишкина А.К. и др. Методика объединения косейсмических смещений земной коры по данным разнородных геодезических сетей: на примере мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011 г., Mw 9.1. Геодинамика и тектонофизика, 2024, 15 (1), 0736.

[8] Froment M., Brissaud Q., Nasholm S.P. et al. Balloon seismology enables subsurface inversion without ground stations. Communications Earth & Environment, 2025, 6, 949.

[9] Степанова И.Э., Батов А.В., Гудкова Т.В. Моделирование источников сейсмического события на Венере по регистрации давления в атмосфере // Космические исследования. 2026, принята в печать.