

ЗОНДИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ GPS

© 2021 г. Г. В. Голубков^{1,2*}, М. И. Манжелей³, А. А. Берлин¹, Н. Н. Безуглов⁴,
А. Н. Ключарев⁴, О. П. Борчевкина^{5,6}, С. О. Адамсон¹, Ю. А. Дьяков¹,
И. В. Карпов^{5,6}, И. И. Морозов¹, Л. В. Эппельбаум⁷, М. Г. Голубков¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

³Центр химической физики атмосферы, Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

⁶Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

⁷Тель-Авивский университет, Тель-Авив, Израиль

*E-mail: golubkov@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 09.04.2020;

после доработки 07.05.2020;

принята в печать 20.05.2020

Наглядным примером проявления особенностей взаимосвязи спутниковой системы GPS как источника и дистанционного зондирования поверхности Земли служат измерения группы Монтенбрука по определению уровня поверхности воды горного озера Вальхензе в Баварии (Германия). Эксперименты были проведены в 2007 году по программе GORS (GPS Occultation, Reflectometry and Scatterometry). Авторы детально описали наблюдаемые особенности, однако не представили их физического обоснования. В настоящей работе показано, что наблюдаемые эффекты обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитных волн со средой, содержащей ридберговские молекулярные комплексы. Они являются основной причиной задержки сигналов спутниковой группировки на высоте от 60 до 110 км.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, GPS-сигнал, D- и E-слои ионосферы, резонансные квантовые свойства среды, ридберговские комплексы.

DOI: 10.31857/S0207401X21030055

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование спутниковой группировки GPS как источника внешнего излучения для зондирования поверхности Земли на первый взгляд является весьма привлекательным, так как позволяет исключить из рассмотрения радары и другие спутниковые системы. Это особенно удобно для измерений уровня поверхности океана с целью обнаружения из космоса возникновения цунами. Последнее требует высокой точности и скорости измерений и не должно включать функцию усреднения по времени. Именно эти обстоятельства представляют собой основные трудности дистанционного зондирования, поскольку связаны с взаимодействием спутниковых сигналов со средой их распространения [1–3], что продемонстрирова-

но в экспериментах [4]. Говоря о точности измерений, следует обратиться к работам группы Монтенбрука по определению уровня поверхности воды горного озера Вальхензе в Баварии (Германия), которые были проведены по программе GORS (GPS Occultation, Reflectometry and Scatterometry) [5–7]. В настоящей работе проведено детальное обсуждение результатов этих измерений с учетом резонансных квантовых свойств D- и E-слоев ионосферы на высотах 60–110 км [8]. Эти свойства обусловлены заселением в неравновесной двухтемпературной плазме орбитально вырожденных состояний ридберговских комплексов, переходы между которыми без изменения главного квантового числа $\Delta l = 0$ соответствуют дециметровому диапазону длин волн. Именно эти состояния приводят к спонтанному поведению отношения

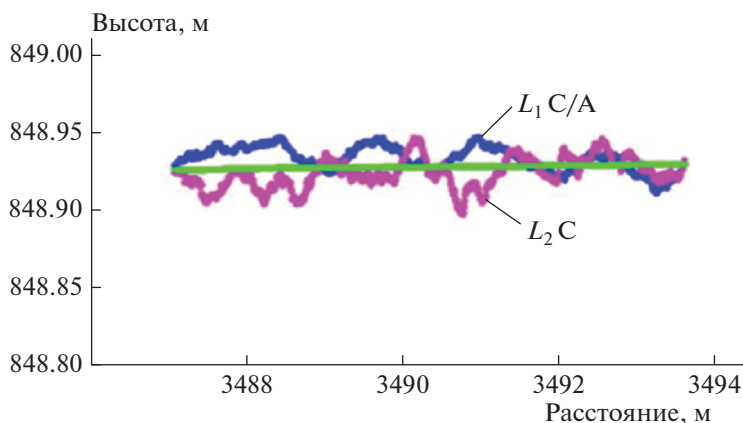


Рис. 1. Профиль поверхности озера Вальхензе, рассчитанный по отраженным сигналам частот L_1 C/A и L_2 C, пришедшим со спутника GPS PRN 17 [5]. Измерения проводились 18 июля 2007 года в 12:54:51 UTC. Уровень воды в озере (прямая линия) отсчитывается от уровня мирового океана.

сигнал/шум на указанных высотах [4] и ответственны за задержку спутниковых сигналов [3].

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определенности обратимся к зависимостям, изображенным на рис. 1, для сигналов GPS с частотами L_1 C/A и L_2 C. Видно, что эти сигналы находятся практически в противофазе, что хорошо объясняется в рамках теории, изложенной в работах [8, 9], и убедительно продемонстрировано на рис. 2 для мощности потока I_{tot} некогерентного СВЧ-излучения D- и E-слоев ионосферы, приходящего на поверхность Земли. На этом рисунке представлены зависимости от температуры T_e и концентрации n_e электронов на высоте 110 км.

Заметим, что такие уникальные свойства СВЧ-излучения нижней ионосферы были обнаружены, начиная с первых систематических исследований по дистанционной пассивной локации поверхности Земли и спутниковой коррекции [8]. Соответствующий вид графика на рис. 2 называется “осиная талия”. Заметим, что положение точки “осиной талии” на оси частот не зависит от температуры электронов T_e . При этом величина мощности потока излучения I_{tot} вдоль вертикальной оси квадратично возрастает с увеличением концентрации электронов n_e .

Дадим теперь качественное объяснение явлений, наблюдаемых в эксперименте из работы [6]. Известно, что при значениях неадиабатического параметра $\lambda = B_a n^3 \sim 10^2$ в орбитально вырожденном комплексе $A^{**}M$ (A^{**} — ридберговская молеку-

ла, B_a — средняя вращательная постоянная молекул M нейтральной среды) происходит существенное нарушение адиабатического приближения по вращению, и понятие поверхности потенциальной энергии (ППЭ) принципиально неприменимо [10]. В этом случае электронная подсистема, определяемая наличием слабосвязанного электрона, становится медленной по сравнению с ядерной подсистемой, т.е. возникает физическая ситуация, противоположная адиабатическому приближению Борна–Оппенгеймера. Учет сильной неадиабатической связи с вращением приводит к квантовому *стохастическому* режиму движения электрона, который активно исследуется в последние годы [11].

В промежуточной области значений $\lambda \sim 1-10$ квантование вращательного движения квазимолекулы A^+M возможно за счет введения “ровибронных” ППЭ [10]. При условии $\lambda \sim 1$ используется “квазиадиабатический” подход к описанию вращения, которое в фундаментальном уравнении для T-оператора столкновений учитывается в элементах K-матрицы реакций [10]. Классическое описание вращательного движения справедливо при условии $\lambda \ll 1$. Заметим, что в случае двухатомной молекулы азота условие $\lambda \sim 10$ соответствует главному квантовому числу $n \geq 30$.

Эффективная заселенность уровней квазимолекулы $A^{**}M$ для орбитально вырожденных ридберговских состояний, $m_n(T_e)$, расположенных выше “горлышка стока” в двухтемпературной рекомбинационной плазме [8, 9], связана с концентрацией свободных электронов $n_e(T_e)$ соотношением [9]

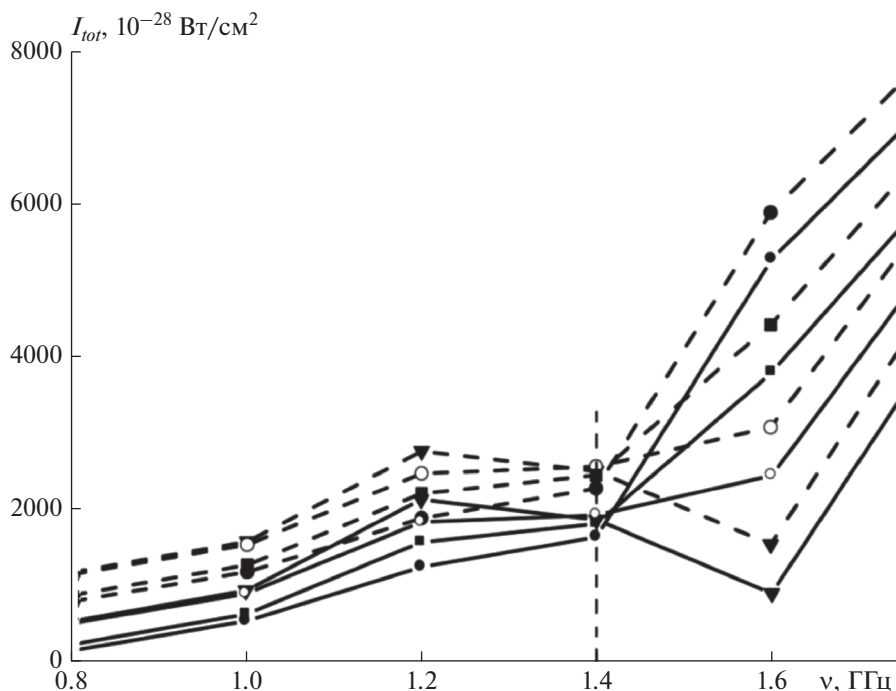


Рис. 2. Зависимость мощности потока излучения I_{tot} от частоты ν для значений концентрации электронов $n_e = 10^4 \text{ см}^{-3}$ (сплошные линии) и $n_e = 1.2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (штриховые) и различных температур электронов T_e : \blacktriangledown – 1000 К, \circ – 1200 К, \blacksquare – 1500 К, \bullet – 2000 К.

$$m_n(T_e) = n_e^2(T_e)K_n(T_e),$$

$$K_n(T_e) = \frac{g_n}{2\Sigma_i} P \left(\frac{2\pi}{T_e} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{1}{2n^2 T_e} \right), \quad (1)$$

где $g_n = 2n^2$ – статистический вес ридберговского состояния, множитель P характеризует степень отклонения от равновесной плазмы и определяется потоком электронов. Полная статистическая сумма положительных ионов определяется как

$$\Sigma_i \approx g_i \frac{T_a}{\langle B_i \rangle [1 - \exp(-\langle \omega_i \rangle / T_a)]}. \quad (2)$$

Здесь g_i – статистический вес молекулярного иона AM^+ для заданного полного электронного момента L и спина S ; T_a – температура нейтральной среды, равная ионной температуре T_i в плазме; $\langle \omega_i \rangle$ и $\langle B_i \rangle$ – средние значения частот колебаний и вращательных постоянных. Тогда, согласно (1), вариации заселенностей ридберговских состояний и температуры связаны простым соотношением:

$$\delta m_n \approx - \frac{m_n}{(nT_e)^2} (3 + n^2 T_e) \delta T_e. \quad (3)$$

Видно, что при $n^2 T_e \approx 1$, когда в электронном спектре формируется *стохастический* режим [11],

вариации заселенностей m_n приблизительно в 4 раза больше вариаций температуры электронов T_e . Это означает, что для значений $\delta T_e < 0$ соответствующие вариации заселенностей $m_n(T_e)$, как и ошибки GPS измерений, согласно (3), *должны возрастать*. В противоположном случае $\delta T_e > 0$ заселенности $m_n(T_e)$ *убывают* (что ведет к уменьшению этих ошибок). В результате такое последовательное чередование ошибок измерений наиболее явно должно проявляться на частоте L_2 сигнала GPS.

В то же время некогерентное СВЧ-излучение на частоте L_1 в области стохастичности спектра в соответствии с данными работы [11] должно вносить незначительный вклад в δm_n . Тогда увеличение заселенностей $m_n(T_e)$ будет следовать за изменением температуры электронов T_e .

Согласно данным расчетов зависимостей мощности потока некогерентного СВЧ-излучения D- и E-слоев, I_{tot} , от частоты, выполненных по программе “Ридберг” для различных электронных температур T_e [8, 9], мощности СВЧ-излучения для базовых частот L_1 и L_2 GPS-сигналов при средней температуре электронов $\langle T_e \rangle \approx 1100 \text{ К}$ практически совпадают. При этом время задерж-

ки сигнала GPS, $\Delta\tau$, связано с мощностью потока излучения I_{tot} соотношением

$$\Delta\tau = f(\nu, n_e, T_e) I_{tot}, \quad (4)$$

где функция $f(\nu, n_e, T_e)$ может быть рассчитана независимо или определена из эксперимента.

Обсудим более подробно экспериментальные данные, приведенные на рис. 1. Мысленно разобьем представленные на этом рисунке зависимости на четыре интервала слева направо, на границах которых величины T_e и $\langle T_e \rangle$ равны. При этом интервалы 1 и 3 соответствуют случаю $T_e > \langle T_e \rangle$. Тогда ошибки измерения (согласно приведенным на рис. 2 зависимостям) должны увеличиваться для кривых, полученных на частоте L_1 , и уменьшаться на частоте L_2 , что совпадает с изображенными на рис. 1 данными. На интервале 2, где $T_e < \langle T_e \rangle$, должно происходить незначительное уменьшение ошибок на частоте L_1 и заметный рост на частоте L_2 , что также соответствует поведению экспериментальных кривых, приведенных на рис. 1. Исключение составляет последний интервал. Поскольку он приходится на стадию выхода спутника из зоны наблюдения, то полученные результаты не согласуются с предсказаниями теории.

Наличие осцилляций внутри каждого из первых трех интервалов для частоты L_2 объясняется тем, что процесс формирования некогерентного СВЧ-излучения D- и E-слоев ионосферы носит интерференционный характер и связан со случайным поведением коэффициентов в полной волновой функции комплекса А**М, в которой учитывается неадиабатическая связь с вращением. Причем, как и в случае l -перемешивания [10, 12], в процесс дополнительно включаются состояния, отвечающие ридберговским сериям с вращательным возбуждением ионного остова, которые обладают меньшими значениями главного квантового числа n .

В соответствии с частотными профилями мощности СВЧ-излучения I_{tot} , представленными на рис. 2 и сходящимися при различных температурах T_e в точке $\nu = 1.4$ ГГц, вариации кривых на частотах L_1 и L_2 являются *противофазными*. Это означает, что увеличение ошибки измерения на одной частоте приводит одновременно к уменьшению ошибки на второй, что наблюдается в эксперименте группы Монтенбрука [5]. Наличие одинаковых ошибок для температуры электронов $\langle T_e \rangle \approx 1100$ К может служить своеобразным эталоном при интерпретации результатов спутниковых измерений. Сказанное является прямым подтверждением

справедливости теоретического подхода, основанного на представлении о резонансных квантовых свойствах среды распространения сигналов GPS [8]. Причем с ростом температуры электронов T_e , связанным с изменением состояния плазмы в D- и E-слоях ионосферы, ошибки определения эффективного уровня поверхности возрастают для частоты L_1 и убывают, соответственно, для частоты L_2 .

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема вертикального зондирования чрезвычайно актуальна в настоящее время. Это связано с необходимостью наблюдений за уровнем океана (формирование цунами) и высотой снежного покрова (таяние льдов). Следует отметить, что для улучшения методики экспериментов, проведенных в работах [5–7], было бы желательно более точно определять точки геодезической привязки. Кроме того, из предложенной теории и результатов эксперимента [6] следует, что использование метода “двух микрофонов” не дает существенного увеличения точности GPS-альтиметра. Применение трехчастотного метода с дополнительным использованием уникальных свойств точек “осиной талии” на частоте 1.4 ГГц, по-видимому, может привести к желаемому результату. Однако проблема корректного определения зависящей от времени концентрации электронов n_e в нижней ионосфере все еще остается нерешенной. Именно на это требуется направить основные усилия исследователей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер АААА-А19-119010990034-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И. // ДАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 510.
2. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Берлин А.А. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 5.
3. Kuvrova V.V., Adamson S.O., Berlin A.A. et al. // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1876.
4. Su S.-Y., Tsai L.-C., Liu C.H. et al. // Ibid. 2019. V. 64. № 10. P. 2137.
5. Helm A., Montenbruck O., Ashjaee J. et al. // Proc. 20th Intern. Techn. Meet. Satellite Div. Inst. Nav. (ION GNSS 2007). Fort Worth, 2007. P. 2011; <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=7461>
6. Stosius R., Beyerle G., Semmling M. et al. // Proc. 2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Sym-

- pos. Honolulu, HI, 2010. P. 3047;
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5654459>
7. *Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L. et al.* // *Adv. Space Res.* 2017. V. 59. № 7. P. 1671.
 8. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // *Хим. физика.* 2014. Т. 33. № 2. С. 64.
 9. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // *Хим. физика.* 2012. Т. 31. № 2. С. 31.
 10. *Golubkov G.V., Golubkov M.G., Ivanov G.K.* // *The Atmosphere and Ionosphere: Dynamics, Processes and Monitoring* / Eds. Bychkov V.L., Golubkov G.V., Nikitin A.I. N.Y.: Springer, 2010. P. 1.
 11. *Безуглов Н.Н., Голубков Г.В., Ключарев Н.Н.* // *Хим. физика.* 2017. Т. 36. № 12. С. 21.
 12. *Голубков Г.В., Иванов Г.К., Балашов Е.М. и др.* // *ЖЭТФ.* 1998. Т. 114. Вып. 1. С. 100.