

## ДВИЖУЩИЕСЯ УЕДИНЕННЫЕ МАКРОНЕОДНОРОДНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ИОНОСФЕРЕ ЗА НЕСКОЛЬКО ЧАСОВ ДО КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2002 г. Ю. К. Калинин, Н. П. Сергеенко

Представлено академиком Е.Л. Фейнбергом 30.03.2002 г.

Поступило 09.04.2002 г.

Рассматривается гипотеза о возникновении в проводящих слоях газовой оболочки Земли – ионосфере макромасштабных плазменных сгущений (горизонтальные размеры 1–4 тыс. км, превышение над фоном 15–30%), возникающих в области F2 на высоте главного максимума за 10–15 ч до катастрофических землетрясений ( $M \geq 6$ ) в окрестностях эпицентра. Объекты затем перемещаются горизонтально примерно вдоль дуги большого круга под различными азимутами с околосвуковой скоростью на расстояния до 8–15 тыс. км. Исходной информацией служат относительные вариации  $\delta f_c$  критических частот  $f_c$  области F2, массивы которых в течение ряда десятилетий накапливаются на мировой сети автоматических ионосферных станций (АИС). Используется статистический метод обработки массивов  $\{\delta f_c\}$  по данным АИС, расположенной в г. Москва, а также квазидетерминированный метод для цепочек АИС, расположенных вблизи участков дуги большого круга протяженностью до 10 тыс. км и проходящих через эпицентры землетрясений.

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Массивы ежечасных значений  $\{\delta f_c\}$  по АИС Москва группировались по годам в интервале 1946–1999 гг. Для каждого года (с номером  $n$ ) рассчитывались значения четвертого статистического инварианта – эксцесса  $Ex(n)$ , выражающегося через централизованные статистические моменты

$\mu_n$  соотношением  $Ex = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3$ . Значения  $Ex > 1$  со-

ответствуют повышенным вероятностям больших выбросов (по сравнению со среднеквадра-

тичными) по сравнению с законом Гаусса. Применительно к массивам  $\{\delta f_c\}$  такое неравенство означает повышенную вероятность возникновения в ионосфере макромасштабных неоднородностей [1, 2]. На рис. 1 представлены кривые  $Ex(n)$ ,  $N(n)$  – число сильных землетрясений ( $M \geq 7$ ) на земном шаре. Из функции  $N(n)$  вычиталось значение параболического тренда  $N_p(n)$ . Величина вариации  $\delta N = N(n) - N_p(n)$  сопоставлялась с величиной  $Ex(n)$ . Коэффициент кросскорреляции между этими величинами очень высок  $\rho = 0.96$ . Если учесть теперь, что АИС Москва находится от очагов землетрясений на расстоянии 3–15 тыс. км, то из факта высокой кросскорреляции можно сделать по крайней мере два кардинальных вывода. Во-первых, сильные землетрясения сопровождалось появлением в ионосфере макромасштабных неоднородностей. Во-вторых, эти объекты могут перемещаться на расстояния в тысячи километров. К таким же выводам приводит рассмотрение эффектов воздействия на ионосферу совокупности ИСЗ со специфическими орбитами – находящимися в интервале высот 1–2 тыс. км. Только для таких ИСЗ обнаружена значимая корреляция  $\rho = 0.6$  между годовыми выборочными значениями эксцесса (но только за летние периоды и в более узком интервале времени 1960–1985 гг.) и значениями так называемой функции  $F$  воздействия ИСЗ на ионосферу [2]. Функция  $F(n)$  определялась как разность между числом ИСЗ с упомянутыми орбитами, запущенных в текущем году, и числом запусков в позапрошлом году. Здесь основным механизмом воздействия ИСЗ на ионосферу предполагались “высыпания” высокоэнергичных частиц на высокоширотных участках траекторий спутников. Эффект “высыпаний” был замечен и непосредственно в области высоких широт [3], и вдали от нее по данным АИС Москва. Представляется существенным, что воздействие на ионосферу сверху происходит от движущегося со сверхзвуковой скоростью источника. По-видимому, движение именно такого источника приводит к образованию ионосферных макромасштабных неоднородностей.

*Институт прикладной геофизики, Москва  
Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн  
Российской Академии наук,  
Троицк Московской обл.*

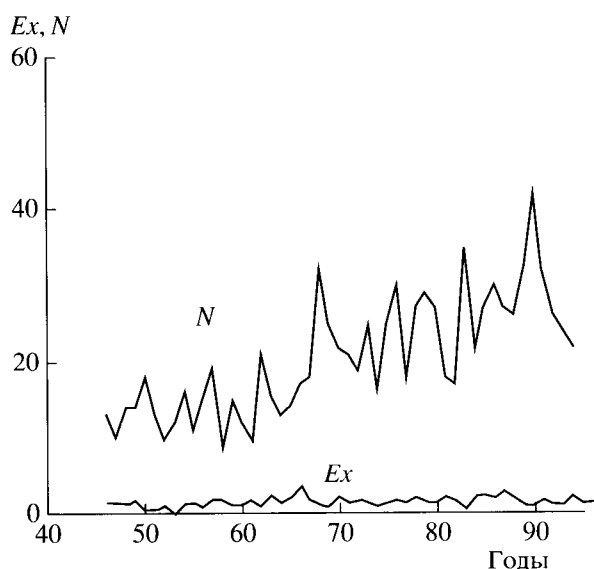


Рис. 1. Сопоставление вариаций эксцесса  $Ex$ , рассчитанного для годовых выборок  $\delta f_c$  и числа землетрясений  $N$  за год за период 1946–1994 гг.

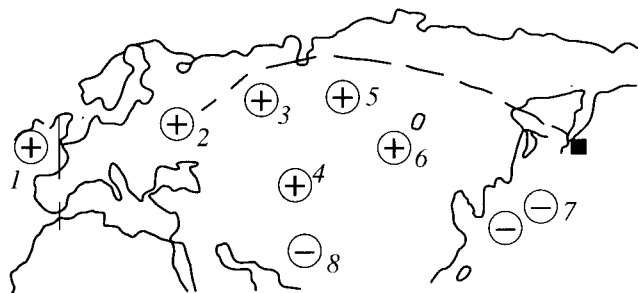


Рис. 2. Фрагмент карты мира в проекции Меркатора. Указано расположение АИС в пунктах Слоу (1), Москва (2), Свердловск (3), Алма-Ата (4), Томск (5), Иркутск (6), Япония (7), Дели (8). Квадрат соответствует Курильскому землетрясению 02.05.1985 г.

## ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ НА ЦЕПОЧКАХ АИС

Рассматривались вариации  $\delta f_c$  в периоды, непосредственно предшествовавшие землетрясениям. На рис. 2 представлен фрагмент карты мира в проекции Меркатора. Здесь кружочки с цифрами 1–8 соответствуют расположению АИС в пунктах Слоу, Москва, Свердловск, Алма-Ата, Томск, Иркутск, Япония, Дели. Квадратик соответствует положению эпицентра Курильского землетрясения (02.05.85 г., 08 h 55 m UT,  $M = 6.4$ ). Штриховой линией дана кривая, соответствующая отрезку дуги большого круга, проходящего через эпицентр и АИС Москва. На рис. 3 даны фрагменты зависимостей  $\delta f_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ . Оси абсцисс соответствуют шкалам времени с отсчетом приращения  $\Delta t$  от момента землетрясения, а расстояния

между осями пропорциональны дальностям от АИС до эпицентра. Наиболее отчетливы положительные группы отклонений для АИС Москва, Свердловск, Томск. Именно точки, лежащие в основании этих групп, послужили исходными данными для проведения штриховой прямой. Согласно данным рис. 2, эти АИС лежат на одной дуге большого круга с эпицентром. Вместе с тем лежащая несколько в стороне от этой дуги АИС Иркутск дает существенно меньшие по амплитуде “импульсы”, чем названные выше три АИС. А для АИС Алма-Ата дело еще осложняется наличием более мощной группы импульсов, лежащей справа от штриховой прямой. Однако совпадающие по времени следы такой группы просматриваются и на АИС Свердловск, Томск, Иркутск. Такая одновременность может быть обусловлена внешними факторами, например, воздействием солнечно-магнитосферных явлений. После исключения таких одновременных групп отношение сигнал/шум для “импульсов”, группирующихся вблизи штриховой прямой, можно оценить интервалом 6–10 дБ, а сами эти импульсы, возникающие тем позднее, чем дальше АИС от эпицентра, следует трактовать как регистрацию движения макромасштабной ионосферной неоднородности с околосвуковой скоростью порядка 1000 км/ч. Время упреждения  $(\Delta t)_0$ , определяемое точкой пересечения штриховой прямой с осью абсцисс, оценивается как  $\Delta t \sim -15$  ч. При этом на АИС, расположенных южнее и восточнее эпицентра (Дели, Канберра, Гавайи), соответствующие положительные импульсы не обнаруживаются. Обращает на себя внимание, что почти все время упреждения необходимо затратить на установление факта движения макромасштабной неоднородности. Вместе с тем после этого до момента землетрясения еще остается 1–3 ч. По схеме, представленной на рис. 2 и 3, было обработано 30 временных интервалов, предшествовавших сильным землетрясениям весны – лета – осени 1985 г., весны 1999 г. и Ташкентскому землетрясению 12 декабря 1980 г. Кроме Восточно-Тихоокеанского региона, в рассмотрение попали землетрясения в Андах, на Аляске, на севере Африки. При этом использовались, помимо названных, данные АИС в США, Канаде, Швеции. Рассмотренные случаи, в которых обнаружены движущиеся неоднородности (отношение сигнал/шум изменялось в пределах 2–10 дБ), составляют примерно треть от общего числа сильных землетрясений за это время. В силу неравномерности расположения АИС по земному шару (только суша) случаи необнаружения трактовались как “уход” неоднородности в сторону океанов (главным образом Тихого). Поэтому вероятность правильного обнаружения и вероятность пропуска обнаружения при использованной сети АИС оценивать нецелесообразно. За этот же период были выявлены 3 траектории

движения макронеоднородностей, которые не привязываются ни к какому из землетрясений. Можно предположить, что появление этих объектов связано с пролетом упоминавшихся выше ИСЗ с почти круговыми орбитами. Вместе с тем очевидно, что только с помощью достаточно полной планетарной системы, использующей совокупность ИСЗ с АИС на борту, а также совокупность сверхдлинных трасс наклонного зондирования ионосферы, можно проконтролировать появление и динамику всех макромасштабных объектов. Такая система должна быть задействована совместно со средствами сейсмических и других наблюдений, чтобы иметь ответы на вопросы, когда и где произойдет сильное землетрясение. Все это потребует больших материальных затрат для создания средств наблюдения и разработки соответствующих алгоритмов работы.

ПРОБЛЕМЫ И ГИПОТЕЗЫ

Основным результатом данной работы является рассмотрение экспериментальных данных по зондированию ионосферы на цепочках АИС в периоды, предшествующие землетрясениям. Основной вывод – результаты рассмотрения не противоречат исходной гипотезе о возникновении в ионосфере движущихся макромасштабных неоднородностей – краткосрочных предвестников землетрясений. Количественные оценки: время упреждения 10–15 ч, азимут движения объектов тяготеет к главным осям напряжений в поле упругих напряжений Земли (в отдельных случаях – к нормальям к ним). Это позволяет выдвинуть следующие гипотезы.

В литосфере: достаточно предположить, что 10–15 ч разделяют начало и конец движения крупного фрагмента (размером 100 × 100 × 10 км). Движение под влиянием ускорения ~10<sup>-6</sup> g разгонит фрагмент до скорости порядка 10 см/с, и отданная в ударе энергия составит избыток плотности энергии порядка 10<sup>3</sup> Дж/м<sup>3</sup>, достаточный для высвобождения энергии землетрясения [3]. И в начале, и в конце движения будет происходить процесс нелокального трещинообразования, движущийся со скоростью, намного превышающей скорость звука в ионосфере. При акустическом механизме передачи воздействия с поверхности Земли до ионосферы на последнюю будет воздействовать эффективный источник, движущийся со сверхзвуковой скоростью. Вероятно, при этом процесс возбуждения макронеоднородности в чем-то схож с процессом, который наблюдается при воздействии на ионосферу “высыпаний” энергичных частиц, как то описано выше. Процесс движения солитоноподобных тонких макронеоднородностей в самой ионосфере еще предстоит смоделировать теоретически, вероятно, с использованием представлений о макромасштабной метастабильности ионосферной плазмы. О необходимости такого подхода свидетельствует

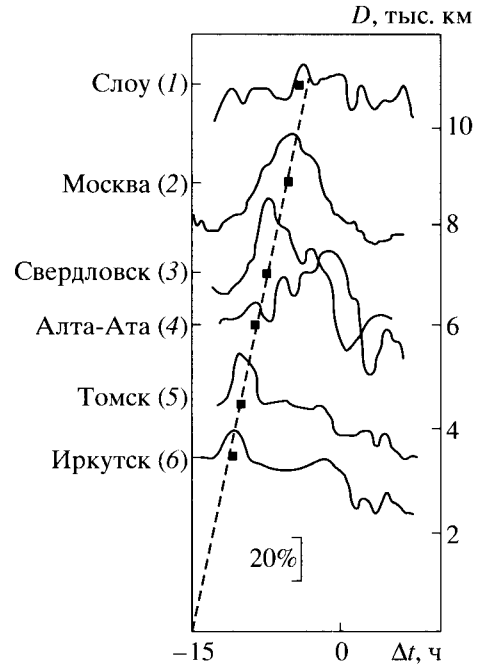


Рис. 3. Вариации  $df_c(t)$  по различным станциям вертикального зондирования, предшествовавшие землетрясению 02.05.1985 г. с эпицентром вблизи северного острова Курильской гряды.

существенное превышение времени наблюдения объектов над временем релаксации за счет продольной амбиполярной диффузии. Это возможно только при существенной роли нелинейных эффектов, ряд проявлений которых установлен авторами [5]. Дальнейшее увеличение объема экспериментальных данных по ионосферным предвестникам землетрясений представляется необходимым условием для осуществления столь непростых теоретических разработок.

Авторы признательны акад. Г.С. Голицыну и акад. Е.Л. Фейнбергу за интерес к работе и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 02–05–64347.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Ю.К., Романчук А.А., Сергеев Н.П., Толмачева А.А. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1998. Т. 38. № 5. С. 78.
2. Калинин Ю.К., Романчук А.А., Сергеев Н.П. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1999. Т. 39. № 4. С. 127–129.
3. Tiuri M., Kraus J. // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 19. P. 5371.
4. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. В.Н. Страхова, В.А. Липеровского. М.: ОИФЗ РАН, 1998. 164 с.
5. Калинин Ю.К., Романчук А.А., Сергеев Н.П. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001. Т. 41. № 2. С. 196.