



УДК 551.510 + 621.396

МАКРОМАСШТАБНЫЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ, ДВИЖУЩИЕСЯ В ОБЛАСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ

Ю.К. Калинин, А.Ю. Репин, Е.Н. Хотенко

Рассматриваются относительные вариации критической частоты области $F2$ ионосферы, получаемые из данных мировой сети наземных автоматических ионосферных станций АИС). На основании рассмотрения принимается гипотеза о существовании в области $F2$ макромасштабных неоднородностей электронной концентрации с горизонтальными размерами 1–3 тыс. км и временем жизни несколько часов. Объекты могут перемещаться на расстояние в несколько тысяч километров с околосвуковой кажущейся скоростью. В случае специфических пространственно-временных группировок объектов принимается утверждение об их сейсмогенной природе. Анализируется также возможная связь с этими явлениями фактов регистрации на спутниковой АИС особой конфигурации сигналов, так называемых задержанных нижних следов. Приводятся геофизические гипотезы, интерпретирующие экспериментальные данные о свойствах сейсмогенных неоднородностей.

Ключевые слова: ионосфера, область $F2$, неоднородности, макромасштаб, землетрясение, спутник, задержанный нижний след.

1. ВВЕДЕНИЕ

Макромасштабные неоднородности области $F2$, перемещающиеся на расстояния в тысячи километров, стали объектом целенаправленных исследований, начиная с последней четверти прошлого столетия. Они проводились по нескольким направлениям. Важный шаг, позволивший в дальнейшем выдвинуть гипотезу об обнаружении объектов подобного вида, по-видимому, впервые был сделан в работе [Сергеенко, 1973]. В ней излагались результаты расчётов коэффициентов корреляции между множествами относительных вариаций критической частоты области $F2$ — величинами $\{\delta f_o\}$, зарегистрированными на разнесенных АИС при временном сдвиге между множествами. Тогда впервые были получены важные результаты. Так для пары АИС Москва — Дели (расстояние около 4 тыс. км.) в отдельных случаях коэффициент корреляции достигал максимальных значений 0,6 при сдвиге множеств на 4 часа. Сдвиг на 3 или на 5 часов приводил к уменьшению коэффициента корреляции до уровня 0,3. Отсюда естественным образом следовала гипотеза об эпизодическом возникновении в области $F2$ сосредоточенных макромасштабных образований с временем жизни не менее, чем 4 часа, и с околосвуковой скоростью горизонтального перемещения (порядка 10^3 км/час). Это находилось в соответствии с известными данными о так называемом «радиусе действия» АИС, полученными из пространственных и временных автокорреляционных функций множеств $\{\delta f_o\}$.

В данной работе предполагается рассмотреть известные данные о соотношении начала подобного движения к катастрофическим землетрясениям магнитудой $6 < M$. Основное внимание уделено цепочкам АИС, расположенным почти вдоль дуги большого круга примерно в тысяче км друг от друга, начиная с эпицентра землетрясения. Наличие на нескольких из них положительных вариаций

с амплитудой $\delta f_o > 10\%$ и длительностью больше часа при соответствующем временном сдвиге рассматривается, как обнаружение сейсмогенного сигнала. Названные признаки позволили утверждать, что в ионосферной области $F2$ существуют макромасштабные движущиеся неоднородности электронной концентрации. Но именно такой объект был назван в качестве возможной причины появления особого вида сигналов, так называемого задержанного нижнего следа (ЗНС) при зондировании ионосферы с помощью АИС, находящейся на спутнике. И ниже подобная редкая ситуация будет рассмотрена наряду с результатами, полученными на сети наземных АИС. В заключении будут рассмотрены геофизические гипотезы, интерпретирующие процессы возникновения и свойства макромасштабных сейсмогенных неоднородностей.

2. РЕГИСТРАЦИЯ СЕТЬЮ НАЗЕМНЫХ АИС МАКРОМАСШТАБНЫХ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОБЛАСТИ $F2$, ОБУСЛОВЛЕННЫХ КАТАСТРОФИЧЕСКИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В работах [Калинин и др., 2002; Kalinin Y.K. et al., 2003] приведены экспериментальные данные, впервые свидетельствовавшие в пользу гипотезы о возникновении в области главного максимума ионосферы (область $F2$) — сейсмогенных макромасштабных неоднородностей с горизонтальными размерами $\sim(1-4)$ тыс. км. Первоначально рассматривалось землетрясение, имевшее место на Курильских островах 02.05.1985 г., 08.55 UT, $M = 6,4$. При этом в течение нескольких часов до! землетрясения имели место вариации $\delta f_o > 0$ — объекты положительного знака на различных АИС. В задачу проводимого ниже рассмотрения входит исследование явлений для ситуаций более высокого уровня отношения сигнал/шум и соответственно большей обеспеченности экспериментальными данными. Поэтому сначала будет рассмотрены неоднородности, возникающие при **очень сильных** землетрясениях. Очевидно, что такое исследование возможно только в случаях, когда траектория движения объектов на значительной своей части совпадает с той или иной цепочкой средств зондирования ионосферы. При этом длина цепочки должна быть соизмерима с размером радиуса Земли или превышать его. Так, в цитированных выше работах это были автоматические ионосферные станции (наземные АИС) в количестве пяти, расположенные почти равномерно вдоль отрезка дуги большого круга протяженностью ~ 10 тыс. км от эпицентра. Ниже также рассматриваются случаи, когда обнаружение неоднородностей осуществлялось методом вертикального зондирования и наземными, и (в двух случаях) космическими средствами. Так во время Новозеландского землетрясения 21 апреля 1999 г. регистрация осуществлялась на трех наземных АИС и на АИС МКС "Мир" [Данилкин и др., 2006; Калинин, 2010]. Протяжённость участка дуги большого круга, занимаемого этими АИС, составляла около 20 тыс. км. Далее на продолжении дуги большого круга располагались АИС, не зарегистрировавшие наличие положительной относительной вариации критической частоты $\delta f_o > 0$. Это интерпретировалось как факт прекращения существования объекта.

Ниже приведена методика, с использованием данных мировой сети АИС за прошлые годы, применяется для выделения сосредоточенных вариаций $\delta f_o > 0$, обусловленных **катастрофическими землетрясениями** с магнитудой $M > 7$. Первыми объектами рассмотрения будут парные землетрясения в Чили в мае 1960 г. [Калинин и др., 2004] с очень близкими координатами эпицентров. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Данные землетрясений в Чили в мае 1960 г.

Дата	Время UT	географические координаты		магнитуда
		долгота λ , град	широта ϕ , град	
21 мая	10.52	-37.50	-73.50	7.3
22 мая	19.11	-39.50	-74.50	8.5

Для анализа использованы положительные вариации $\delta f_o > 0$, зарегистрированные (или не зарегистрированные) на 17 АИС, входящих в мировую сеть. Данные об АИС приведены в табл. 2. На рисунке 1 показана карта Мира в проекции Меркатора, на которой кружочками обозначены местоположение АИС. Значком ломаной стрелки обозначено положение эпицентров землетрясений.

Из области эпицентра под несколько разными азимутами проводились дуги больших кругов. Из них были выбраны те, которые удовлетворяли двум условиям. Во-первых, вблизи них группируются как минимум 4–5 АИС. И во-вторых, время наступления сосредоточенной вариации $\delta fo > 0$ пропорционально расстоянию L от АИС до эпицентра. Количество АИС, используемых для анализа, определялось ещё и наличием данных в Интернет для соответствующего временного интервала. Вместе с тем, как следует из табл. 2 и данных рис. 1, рассматриваемые АИС расположены на всех континентах.

Таблица 2. Данные об АИС, измерения которых использованы для анализа

№	Название	географические координаты		L, тыс. км
		λ , град	ϕ , град	
1	Бёрд	240	-80	5
2	Гранд Багама	282	27	8
3	Боулдер	255	40	11
4	Форт Монмаус	285	40	11
5	Слоу	0	52	13
6	Де Билт	5	52	13
7	Москв	37	56	16
8	Свердловск	61	57	17
9	Томск	85	56	26
10	Иркутск	104	53	24
11	Дели	77	27	19
12	Акита	140	40	22
13	Сингапур	103	1	17
14	Иоганнесбург	28	-26	10
15	Канберра	149	-28	28
16	Адак	183	52	15
17	Мауи	203	21	12

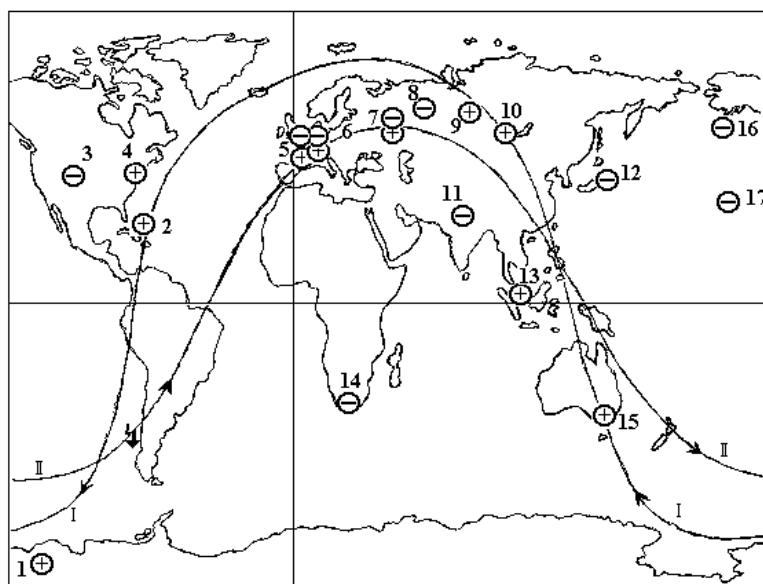


Рис. 1. Расположение АИС во время землетрясений в Чили в мае 1960 г. Цифры обозначают ионосферные станции, приведенные в табл. 1., знаки плюс и минус внутри кружков соответствуют наличию или отсутствию ионосферного аффекта от землетрясении, эпицентр которых отмечен стрелкой. Кривая I соответствует землетрясению 22 мая, а кривая II — 21 мая.

На рисунке 2 приведены зависимости $\delta fo(t)$ для землетрясения 22 мая. Для АИС Бёрд — за период 22.05 – 25.05.1960 г. Для остальных АИС даны лишь отрезки этой зависимости. Возле названия каждой АИС приведены расстояния до эпицентра в предположении, что объект двигался от эпицентра на юго-запад последовательно проходя АИС: Бёрд, Канберра, Сингапур и т.д., вплоть до ст. Багамы. Из зависимостей $\delta fo(t)$ для каждой АИС выбраны отрезки, сдвинутые по времени на величину определяемую скоростью движения объекта. После прохождения АИС ст. Багамы объект предположительно завершил первое кругосветное движение и начал совершать второе. Об этом отчётливо свидетельствует узкий «импульс» в зависимости $\delta fo(t)$ на АИС Бёрд в начале суток 25.05.1960 г. После него происходит значительное по амплитуде и длительности изменение $\delta fo(t)$, не связанное по рассматриваемым признакам с объектом, а являющееся следствием изменения магнитной активности на высокоширотной станции. Вместе с тем, на следующем «обороте» узкий максимум $\delta fo(t)$ «прорезается» даже сквозь ионосферную бурю, когда её интенсивность начинает спадать. Некоторые признаки локального максимума «второго оборота» можно усмотреть в зависимостях $\delta fo(t)$. Таким образом, прямая линия на рис.2 обусловлена большим количеством точек в интервале дальностей до 100 тыс. км. И на временном интервале более 100 часов. Кажущаяся скорость движения равна 10^3 км/час. Существенно, что экстраполяция линии к местонахождению эпицентра $L \rightarrow 0$ приводит не к моменту главного удара, а к моменту, упреждающему его.

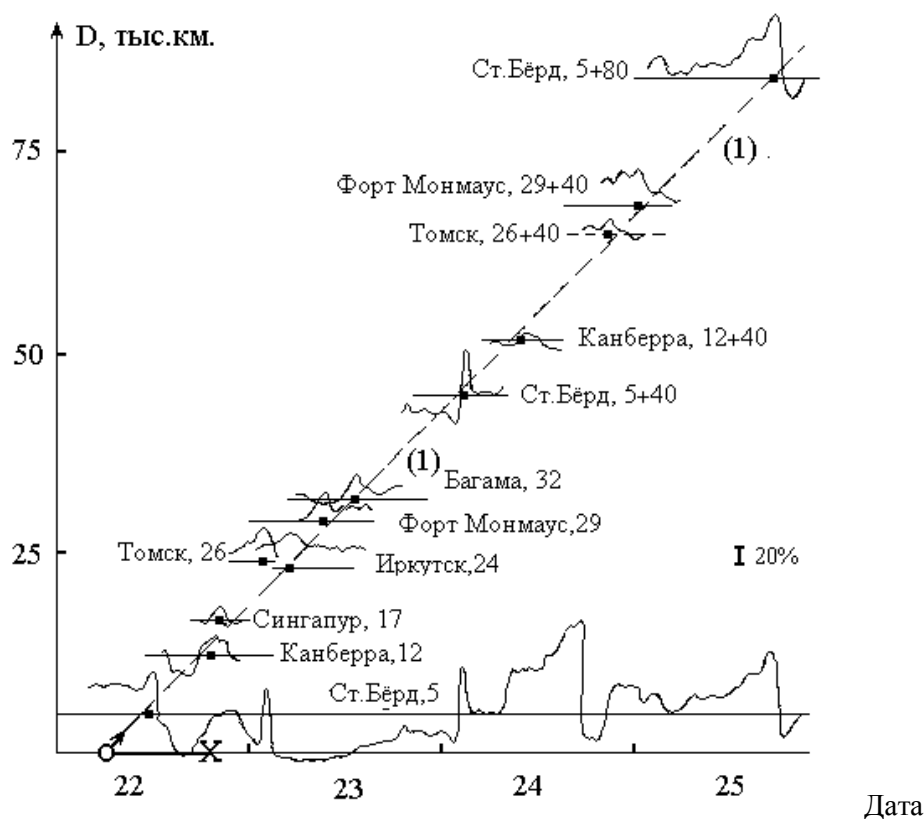


Рис. 2. Сводные графики зависимостей $\delta foF2(t)$ в процентах для различных ионосферных станций. По осям абсцисс — время, соответствующее датам суток 22 – 25 мая 1960 г., масштаб отклонений по оси ординат показан справа вертикальным отрезком, соответствующим $\delta foF2(t)$, равным 20%. Общая ось ординат — шкала дальности в тыс. км. Для каждой кривой указано название станции и расстояние ее от эпицентра в тыс. км. Для ст. Берд ось абсцисс и зависимость $\delta foF2(t)$ приведены полностью во всём рассматриваемом интервале дат. Для остальных станций приведены отрезки оси абсцисс.

Начальное упреждение $\Delta t_0 = (12-13)$ часов. Оно оценивается по времени от момента главного удара, отмеченного на рис. 2 крестиком, до момента первой реакции ионосферы на события, предвещающие землетрясение. Это отмечено утолщённой частью оси абсцисс с ломаной стрелочкой в начале. Данные, представленные на рис. 2 и прокомментированные выше данные, относящиеся к землетрясению на Курильских островах 02.05.1985 г., позволяют выдвинуть особую

гипотезу о динамике объектов при возникновении ионосферной бури. А именно, объект, регистрация которого затруднена во время бури, после её окончания обнаруживается вновь. Весьма возможно, что в этой ситуации нарушается принцип суперпозиции. Объект как бы «тонет в буре, но потом выныривает из неё». Аналогичное явление имело место и во время упомянутого выше Курильского землетрясения. Проверка данной гипотезы является делом будущего.

Теперь следует возвратиться к рис. 3 с целью рассмотрения траектории II — объекта, возникшего после землетрясения 21 мая, $M=7,3$. Движение объекта происходит в противоположном (по сравнению со случаем 22 мая) направлении, в сторону Европы, что отмечено на траектории стрелочкой. Движение этого объекта привело к ионосферным эффектам с несколько иными параметрами: $\Delta t_0 = 11$ часов, но кажущаяся скорость является сверхзвуковой $1,6 \cdot 10^3$ км/час. Последнее значение выходит за интервал скоростей, определённых в цитируемых выше работах. На рис. 3 представлены кривые $\delta f_o(t)$ для станций Слоу и Москва. Наличие двукратных кругосветных движений подтверждается данными АИС Слоу, а также, расположенными неподалёку АИС Де Билт и Дурбес. Однако до АИС Москва кругосветное движение, по-видимому, не простирается. То есть движение по кругосветной траектории I на рис. 2 происходит на дальности не намного превышающую величину $5 \cdot 10^4$ км.

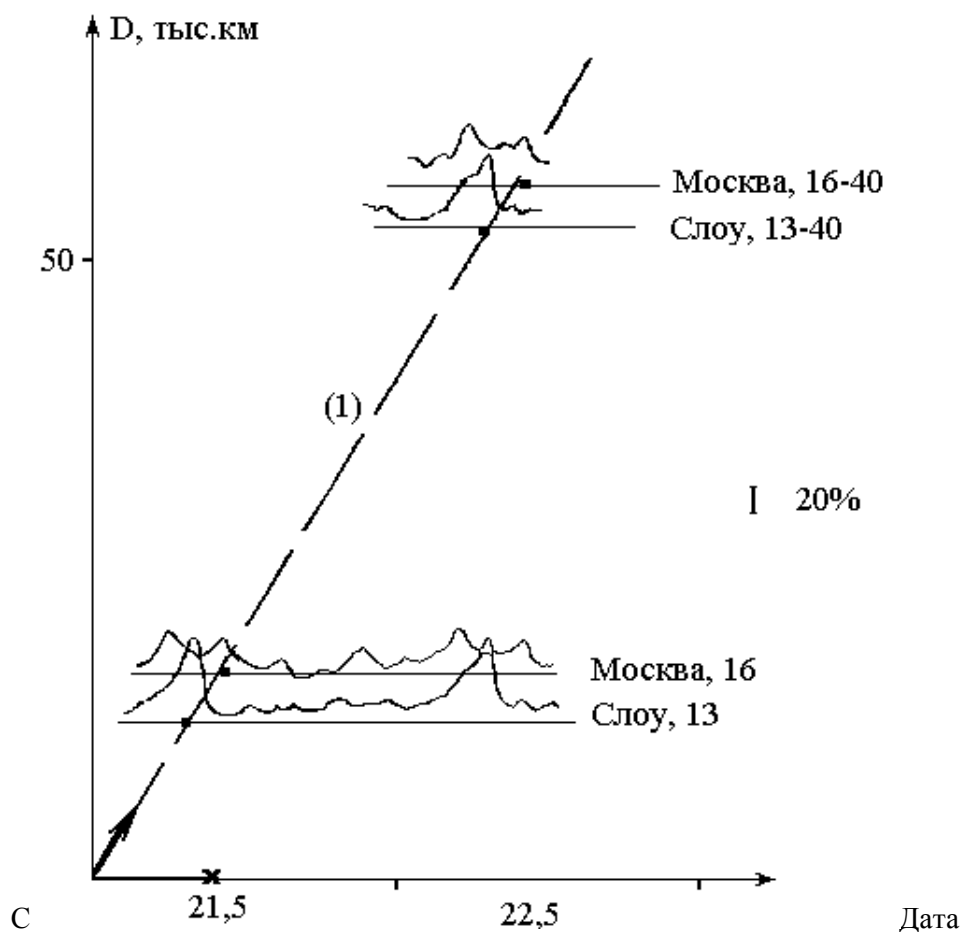


Рис. 3. Вариации $\delta f_o F_2(t)$ для станций Слоу и Москва во время землетрясения 21 мая 1960 г. в Чили.

Далее переходим к рассмотрению ионосферных эффектов, возникших после землетрясения на Аляске 28 марта 1964 г. Следует отметить и подчеркнуть, что это землетрясение было предметом внимания многих исследователей. Так в работе [Leonard R.S., 1965] впервые сообщается об обнаружении отрицательных возмущениях $\delta f_o < 0$ сразу после землетрясения. Динамика объекта рассматривалась по данным «ближних» АИС — Колледж, Адак и дальних АИС — Мауи, Боулдер на интервале нескольких часов после землетрясения. В проводимом здесь рассмотрении речь идёт

об объектах с положительным знаком $\delta fo > 0$, возникающих за несколько часов до землетрясения.

На рисунке 4 приведены данные о расположении АИС, данные которых были использованы при анализе состояния ионосферы до и после Аляскинского землетрясения. Забегая вперёд, можно отметить, что на четырёх станциях — Колледж, Адак, Мауи и Канберра были отмечены, как «прямые», так и «кругосветные сигналы». Пунктирная кривая I на рис. 4 соответствует Аляскинскому землетрясению. На рисунке 4, аналогичному рис. 2, представлена зависимость $\delta foF2(t)$ для станции Мауи. Выше на расстоянии кратном $4 \cdot 10^4$ км. расположены соответствующие участки записи $\delta foF2(t)$. По крайней мере, для трёх гипотетических кругосветных объектов в предположении их равномерного движения можно провести прямую линию. Данные рис. 5 свидетельствуют о двух возможностях проведения прямых с несколько разным наклоном. Им соответствуют кажущиеся скорости движения 1100 км/час и 970 км/час. Для обеих интерпретаций имеет место одинаковое время упреждения $\Delta t = 14$ часов. Другой особенностью данной ситуации является относительно низкий уровень «прямого сигнала». Причины этого могут быть различны. Одна из них — возможное «наполнение» макромасштабных объектов неоднородностями меньшего масштаба и различного знака.

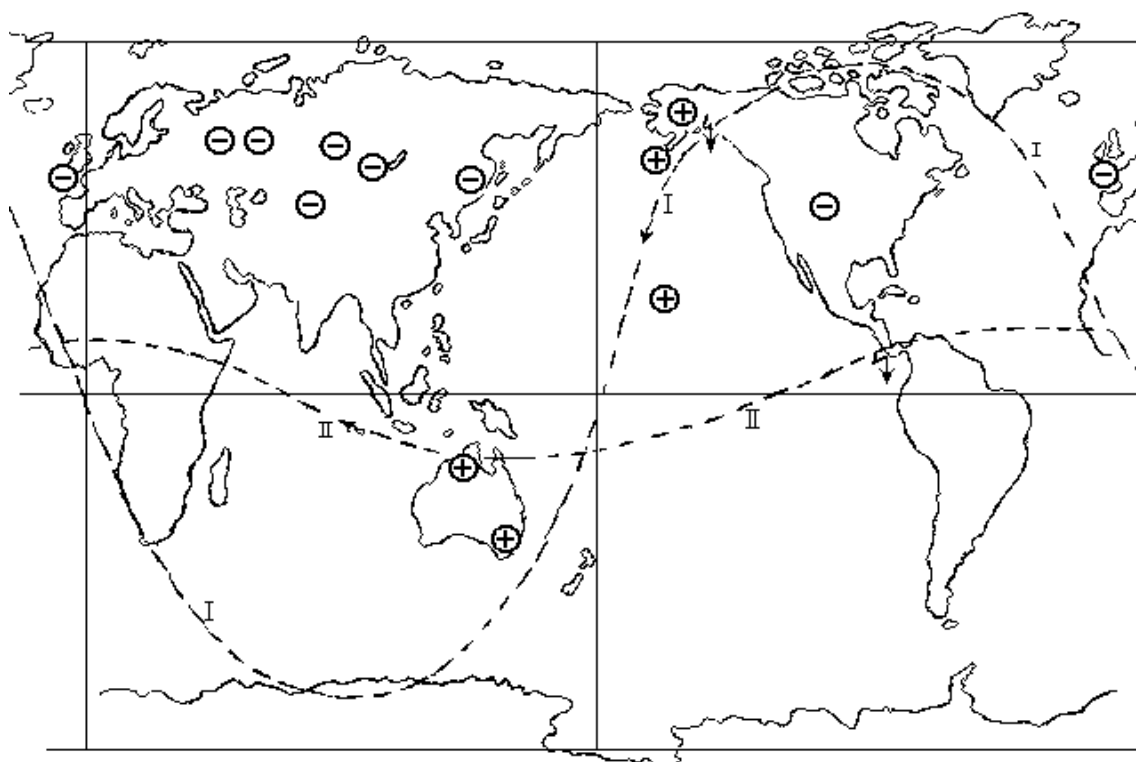


Рис. 4. Расположение АИС во время землетрясений: на Аляске, март-апрель 1964 г. — кривая I; в Панаме 31 марта 1999 г. — кривая II.

Следует отметить, что кругосветные «сигналы» наблюдались также на АИС Канберра. Объединяя результаты по трём рассмотренным землетрясениям, можно принять оценку для дальности перемещения ионосферных объектов, порождаемых землетрясениями с $M > 7$ порядка $(4 - 10) \cdot 10^4$ км. На рисунке 4 приведены также данные о вариациях $\delta foF2(t)$ на станции Дарвин, Австралия, после землетрясения в Панаме 31 марта 1999 г., 05.55 UT, $M = 7$. Такие данные получены только для одной АИС, но величина эффекта превышает 60%.

Остальные АИС, кстати сказать, расположенные вне экваториальной зоны, неоднородности от данного землетрясения не зарегистрировали. Представляет интерес гипотеза о том, что ориентация движений сейсмогенных макромасштабных объектов в области $F2$ ионосферы связана со структурой литосферы. Так на рис. 6 представлен фрагмент карты Мира в проекции Меркатора. На карте даны границы литосферных плит [Жарков, 1989]. Стрелками отмечены положения эпицентров и

направления движений по дугам больших кругов сейсмогенных крупномасштабных неоднородностей области $F2$ ионосферы. Обращает на себя внимание тот факт, что эти направления движения почти ортогональны границам литосферных плит.

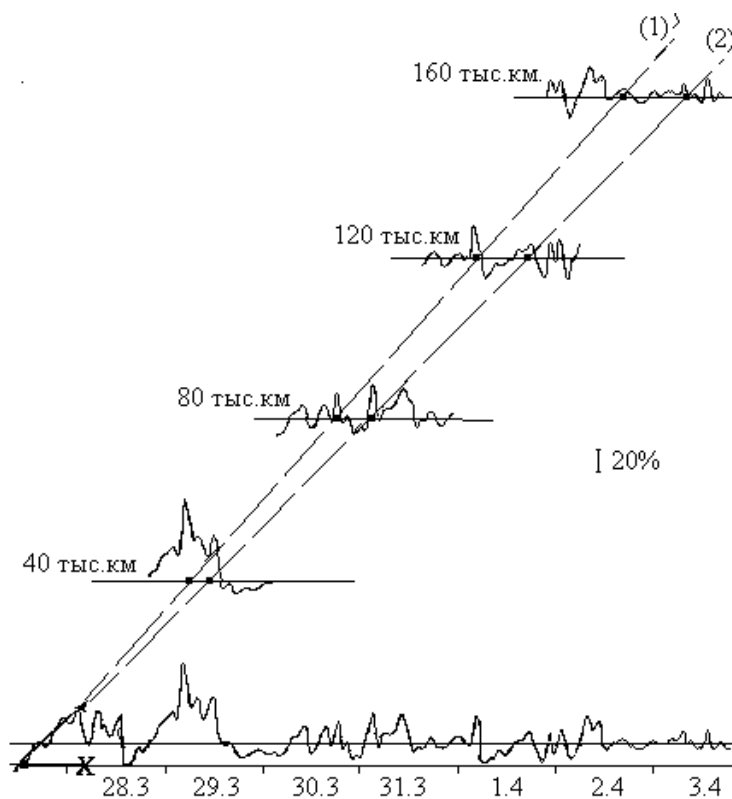


Рис. 5. Вариации $\delta foF2(t)$ на станции Мауи до и после землетрясения на Аляске 28 мая 1964 г.; 1 и 2 – различные варианты восстановления траектории движения объекта.

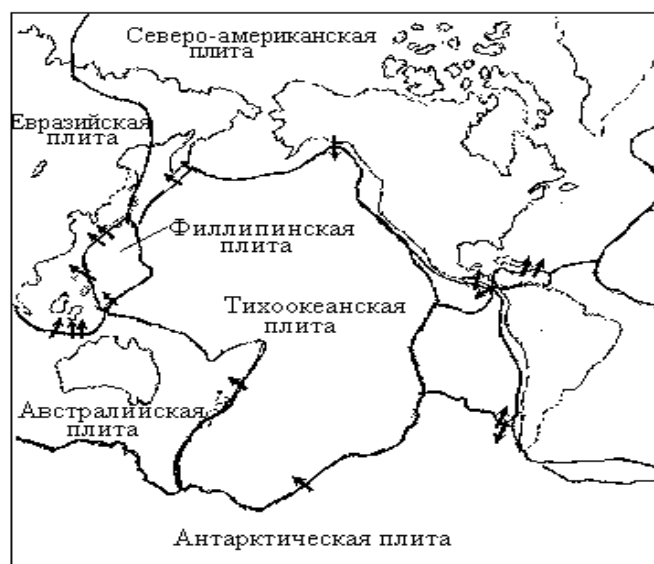


Рис. 6. Границы литосферных плит и ориентация траекторий ионосферных сейсмогенных неоднородностей в окрестностях эпицентров.

3. ПЕРЕСЕЧЕНИЕ ОРБИТ СЙСМОГЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ И ИСЗ СО СПУТНИКОВОЙ АИС

3.1. ИСХОДНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Методика обработки данных, повторимся, состоит в переходе от данных АИС — $foF2$ к относительным вариациям $\delta foF2$. За несколько суток до и после момента землетрясения строились зависимости вариаций от времени $\delta foF2(t)$ для каждой АИС. После этого производилась двойная селекция визуально выделяемых одиночных положительных вариаций. На карте Мира положения таких АИС выделялись специальными знаками. Предметом дальнейшего поиска служили цепочки среди выделенных АИС, расположенных вблизи дуги большого круга. После этого производилось новое построение зависимостей $\delta foF2(t)$ друг под другом со сдвигом осей абсцисс на величину, пропорциональную расстоянию от АИС до эпицентра землетрясения. Предполагалось, что на таком комплексном графике локальные максимумы зависимостей $\delta foF2(t)$ располагаются тем позднее, чем больше расстояние от АИС до эпицентра землетрясения. Построение прямой линии, вокруг которой группируются максимумы, определяет среднюю кажущуюся скорость равномерно движущегося объекта. Экстраполяция прямой к временной оси абсцисс, соответствующей эпицентру, позволяет оценить время упреждения — интервал между появлением неоднородности и моментом главного удара. Подобным способом были обработаны несколько случаев. Это позволило оценить параметры обнаруженных объектов. Их примерно одинаковые продольные и поперечные горизонтальные размеры заключены в пределах 2 – 4 тыс. км. Величина $\delta foF2(t)$ превышает 15 – 20 % (Известен случай, когда $\delta foF2(t) > 50$ %), см. рис. 7.

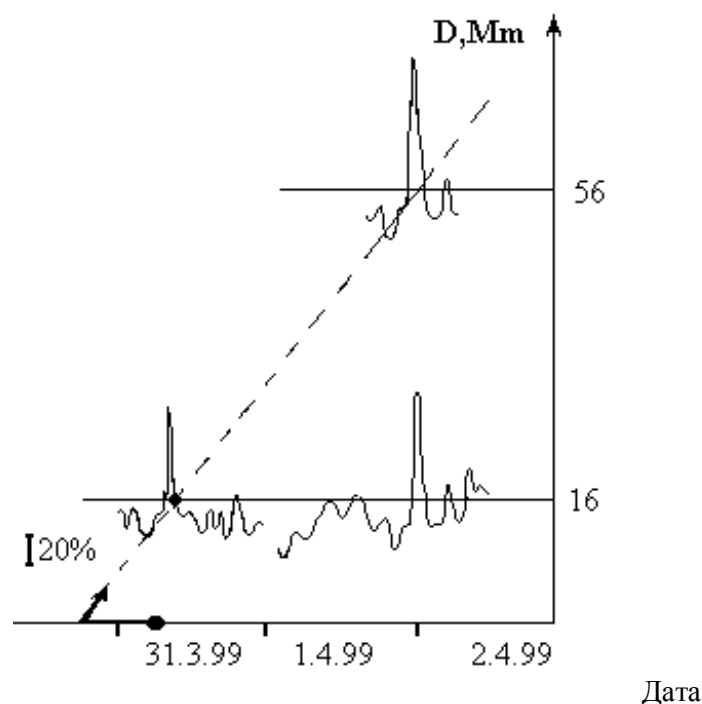


Рис. 7. График вариаций $\delta foF2(t)$ на станции Дарвин, Австралия, после землетрясения в Панаме 31 марта 1999 г., 05:55 UT, $M = 7$.

3.2. ПЕРЕСЕЧЕНИЕ 21 АПРЕЛЯ 1999 Г., СОПРОВОЖДАВШЕЕСЯ ПРИЗНАКОМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАДЕРЖАННОГО НИЖНЕГО СЛЕДА

В 1999 г. с помощью АИС, располагавшейся на ИСЗ «Интеркосмос 1837», было получено большое количество стандартных ионограмм. Однако изредка на ионограммах регистрировался нестандартный трек, так называемый задержанный нижний след (ЗНС), подробнее см. [Данилкин и др., 2006]. При этом возникла естественная гипотеза о наличии в ионосфере макромасштабной неоднородности, обуславливающее данное явление рефракцией радиоволн вблизи её краевой области.

Речь шла о возникновении нестандартного трека на дистанционно-частотной характеристике (ДЧХ) спутниковой АИС. В данном случае появление такого трека было соотнесено к ситуации пересечения траектории ИСЗ с траекторией движения одной из сейсмогенных неоднородностей $\delta f_o F_2(t)$, обнаруживаемых с помощью специфических сигналов на цепочках наземных АИС. Следует опять-таки отметить, что обнаружение сейсмогенной ионосферной неоднородности является редким событием. Необходимо, чтобы траектория движения объекта совпадала с особой цепочкой АИС, например, протяжённостью более радиуса Земли. Пересечение двух траекторий — одиночного сейсмогенного объекта и ИСЗ, когда они совмещаются в пространстве-времени, является ещё более редким событием. Известны только две таких как бы достаточно ясных ситуаций. Землетрясение 21 апреля 1999 г. относится к одной из них. Оно состоялось в южной части Тихого океана несколько севернее Новой Зеландии. На рисунке 8 представлен комплексный график зависимостей $\delta f_o F_2(t)$ для АИС Дарвин (Австралия), Ахмадабад (Индия), Чилтон и Рим (Европа). Шкала расстояний от эпицентра до соответствующей АИС расположена справа. В левой части рис. 8 дана цена деления по вертикали в процентах для $\delta f_o F_2(t)$, отсчитываемой от различных осей абсцисс. Они относятся к нескольким АИС, чьё положение на рис. 8 пропорционально расстоянию от АИС до эпицентра. Также справа дано обозначение местоположения ИСЗ при регистрации ЗНС. Предполагается, что ИСЗ пролетал на некотором расстоянии от траектории объекта, обозначенного на рис. 8 эллипсом, воспроизводящим размеры неоднородности. Следует напомнить, что появление ЗНС трактуется, как рефракционный эффект на краю неоднородности. А именно, возможны два типа траекторий, возвращающихся к ИСЗ. Один из них стандартный, обусловленный вертикальным распространением зондирующего сигнала. Другой — связан с рефракцией в краевой области неоднородности.

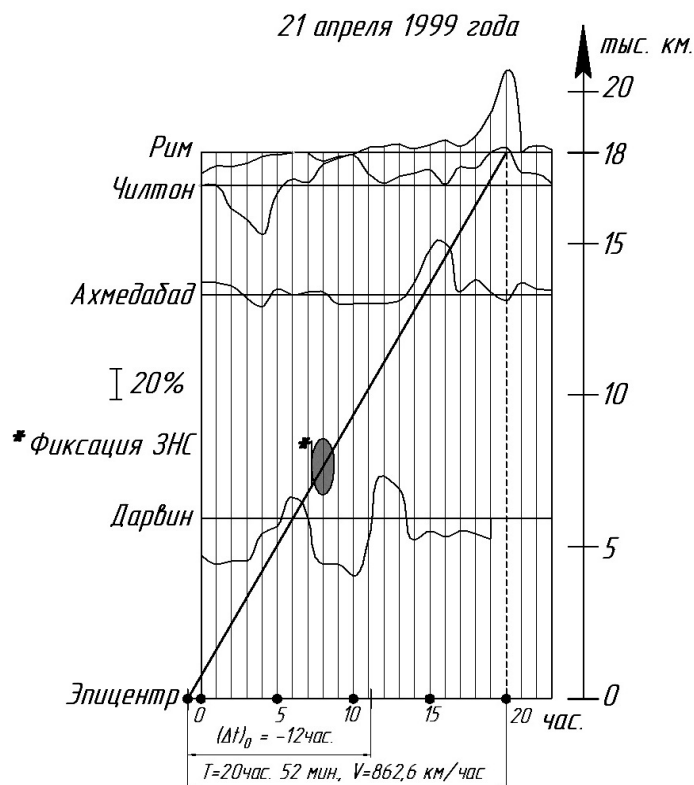


Рис. 8. Комплексный график $\delta f_o F_2(t)$ для различных АИС, оси абсцисс которых сдвинуты по вертикали пропорционально расстоянию АИС от эпицентра; масштаб по вертикали для каждого графика и значок фиксации ЗНС на космической АИС — слева.

Данные на рис. 8 позволяют оценить параметры движения неоднородности. Величина упреждения $(\Delta t)_0$ — составляет 12 часов; скорость равна $V \approx 900$ км/час. Всё это находится в

соответствии с данными цитированных выше работ. На рисунке 9 представлена карта Мира в проекции Меркатора. На ней нанесены малые кружочки, соответствующие положениям АИС на всех шести обитаемых континентах. Каждый из кружочков окружён более широкой окружностью, условно отображающей «радиус действия» АИС, принятый равным 10^3 км.

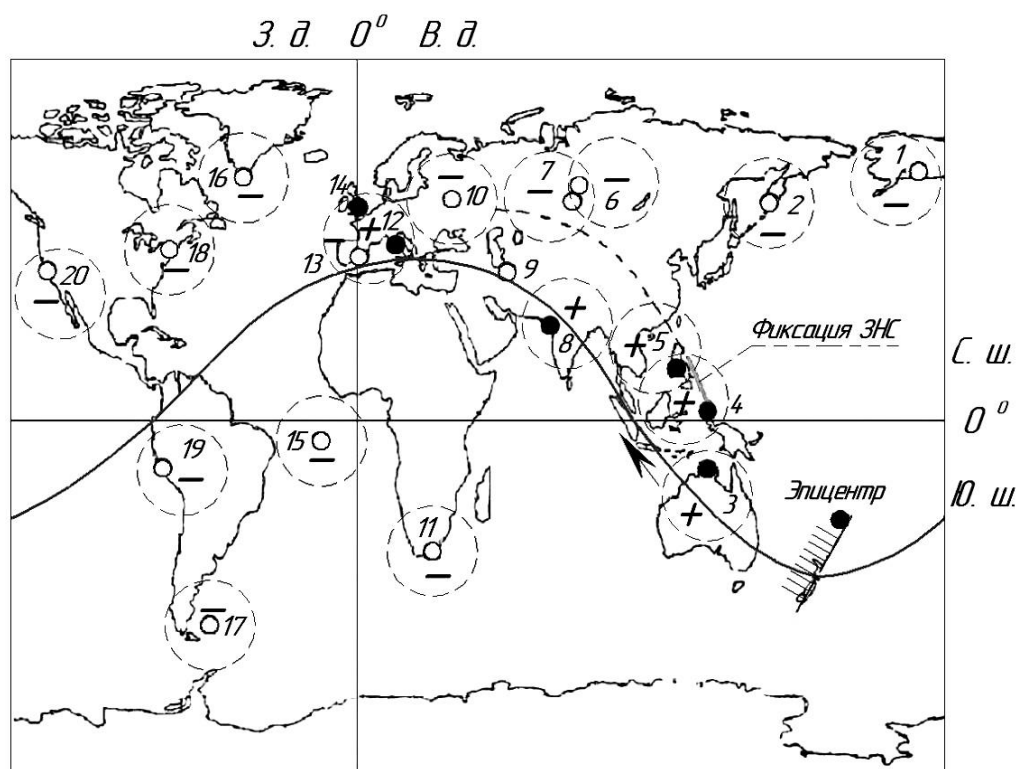


Рис. 9. Движение сейсмогенной неоднородности в области $F2$ ионосферы и обнаружение ЗНС спутниковой АИС.

Внутри кругов стоят номера станций (здесь не расшифровываются). А также знаки минус для АИС, в данных которых не обнаружены локальные максимумы, группирующиеся рядом с прямой, представленной на рис. 8. Знаками плюс помечены четыре АИС, чьи зависимости $\delta foF2(t)$ обладают характерными максимумами, по времени и координатам сгруппированные вблизи прямой на рис. 8. Эта прямая в виде участка дуги большого круга представлена на рис. 9 сплошной кривой. Следует отметить, что положение кривой носит компромиссный характер. Она проходит несколько южнее точки эпицентра, расположенного северо-восточнее Новой Зеландии. Подобное смещение примерно на 2 тыс. км. от места образования ионосферного объекта по отношению к месту выделения вблизи поверхности Земли энергии порядка 10^{16} наблюдалось и в случае наземного мощного взрыва [Дзвонковская и др., 2008]. Вместе с тем дуга большого круга на рис. 9 проходит перпендикулярно границе тихоокеанской литосферной плиты, помеченной полосатой структурой. Такое наблюдалось практически во всех проанализированных случаях динамики сейсмогенных ионосферных объектов. Далее следует указать на то, что индонезийская и ашхабадская АИС не дали надёжного обнаружения объекта. Ашхабадская АИС вообще дала чёткое необнаружение. Две АИС в Великобритании, Чилтон и Слоу, дали противоположные результаты по обнаружению. Существенно, что испанская АИС не дала заметного эффекта вблизи прямой на рис. 8. И расположенная в Южной Америке АИС помечена знаком минус. Всё это заставляет предположить, что объект прекратил существование на дальности $D \approx 20$ тыс. км. При магнитуде землетрясения $M = 6$ это находится в согласии с эмпирической формулой для предельной дальности D_i , на которой объекты прекращают свое существование [Дзвонковская и др., 2008]. На рисунке 9 пунктиром показана траектория ИСЗ и тонкой линией с изломом показано место, где спутниковая АИС зарегистрировала ЗНС. Совокупность данных, представленных на рис. 8 и рис. 9, позволяет сделать вывод об обнаружении сейсмогенной макромасштабной неоднородности в области $F2$ двумя независимыми методами. В данном случае процесс обнаружения завершился за 4 часа до землетрясения. Гипотетические координаты эпицентра можно было бы указать с погрешностью порядка 10^3 км.

3.3. ПЕРЕСЕЧЕНИЕ 5 АПРЕЛЯ 1999 Г., НЕ СОПРОВОЖДАВШЕЕСЯ ПРИЗНАКОМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАДЕРЖАННОГО НИЖНЕГО СЛЕДА

Аляскинское землетрясение произошло 05.05.1999 г. Соответствующие положительные возмущений δf_oF2 были зарегистрированы на цепочке из семи наземных АИС. Общая протяжённость цепочки составляет 36 тыс. км. Начало цепочки упреждает момент главного удара землетрясения на 11 – 12 часов, см. рис. 10. По оси абсцисс отложено время от момента регистрации положительной вариации на АИС, расположенной вблизи эпицентра. По оси ординат — дальность от эпицентра, измеряемая в мегаметрах (Мм). Чёрные кружочки относятся к наземным АИС. Цифры вблизи кружочков 1 – 4, 7 – 9 соответствуют обнаружению локальных максимумов на АИС, расположенной на Аляске, двум АИС в Центральной Сибири, одной на юге Африки, далее — на Фолклендских островах и двум — в США. Квадратики 5 и 6 соответствуют отсутствию регистрации аномальных сигналов на АИС, располагавшейся на ИСЗ «Мир», на двух витках, пересекавших область расположения макромасштабной неоднородности южнее острова Мадагаскар [Данилкин и др., 2006]. Светлый кружочек 10 на рис. 10 означает, что объект не совершил полностью кругосветное движение, и второй раз АИС на Аляске его не зарегистрировала. Крестик на оси t на рис. 10 обозначает момент главного удара землетрясения.

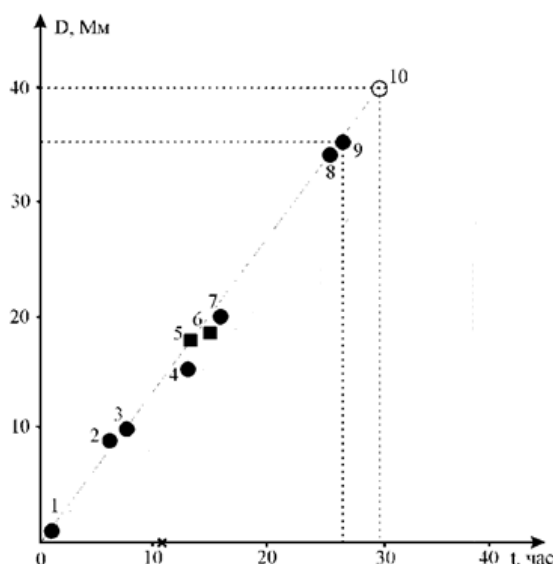


Рис. 10. Планетарное движение макромасштабной неоднородности области $F2$ ионосферы, образованной во время Аляскинского землетрясения 05.05.1999 г.

Обращает на себя внимание тот факт, что макромасштабная ионосферная неоднородность возникла за 11 часов до землетрясения. Это находится в соответствии с данными работ [Калинин и др., 2002, 2004]. После землетрясения объект существует в течение почти 20 часов. На рисунке 11 представлен фрагмент карты Мира, где черными кружочками отмечено положение АИС с теми же номерами, что и на рис. 10. Пунктирной кривой, соответствующей дуге большого круга, ориентированной ортогонально ближайшей границе литосферной плиты [Калинин, 2002, 2004; Жарков, 1989], отмечена траектория движения макромасштабной неоднородности. Её локальные изображения в окрестностях той или иной АИС представлены крупными кружками. На рисунке 11 не отмечены АИС, на которых не были обнаружены локальные максимумы в соответствующие моменты времени. К числу таких АИС относятся три станции в Японии, АИС в Магадане, в Москве, в Европе, в Канаде и в Австралии. Цепочки крестиков 5 и 6 приблизительно соответствуют пассажирам ИСЗ «Мир», проходящего на небольшой высоте над неоднородностью, но не сопровождавшиеся обнаружением ЗНС.

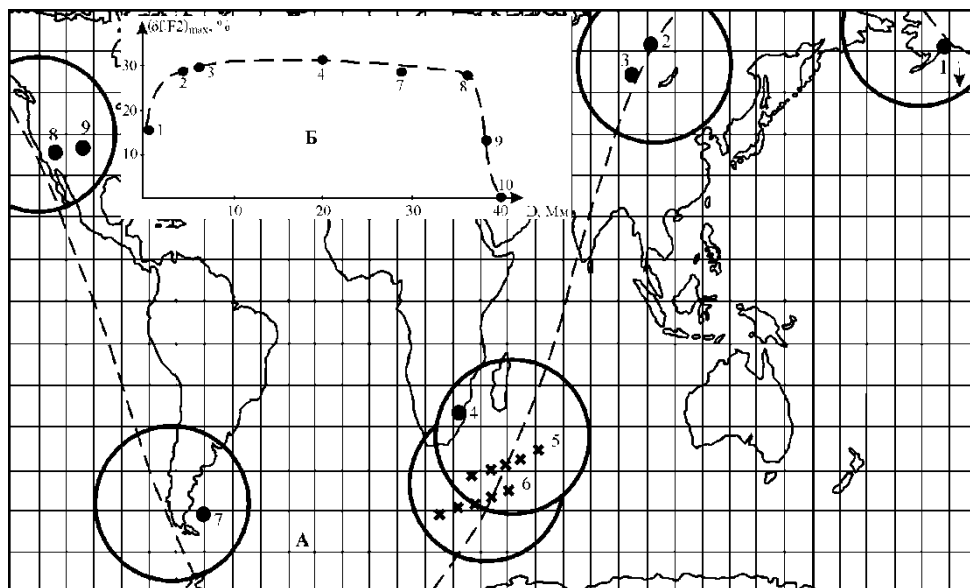


Рис. 11: А — Элементы кругосветной траектории движения макромасштабной неоднородности, расположение АИС и схематическое положение неоднородности; Б — Зависимость вариаций $\delta foF2_{\max}$ от дальности.

На фрагменте Б представлена нелинейная зависимость максимальной «амплитуды» $\delta foF2_{\max}$ от дальности. Зависимость содержит почти горизонтальный участок — точки 2–8 и два «крутых» участка — точки 1 и 8, 9. Следует отметить, что время исчезновения объекта ~ 3 часа близко ко времени диффузионной релаксации τ_D . Так, полагая $\tau_D = H^2/D$, для $H=10^7$ см и $D=10^{11}$ см²/сек получаем, что τ_D примерно равно 3 часам [Альперт, 1979]. При проведении пунктирной линии — компромиссной дуги большого круга, учитывалось, что согласно данным работы [Калинин, 2010], такая дуга гипотетически должна быть ориентирована нормально к границе литосферной плиты в районе землетрясения. Все это позволило с учетом оценок размеров неоднородностей обосновать схему движения объекта, представленную на рис. 11А. Точки на рис. 10 достаточно тесно группируются вблизи прямой линии, что свидетельствует о равномерном движении объекта вдоль дуги большого круга с околосвуковой скоростью.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что сейсмогенные макромасштабные неоднородности области $F2$ ионосферы обладают рядом специфических свойств, обуславливающих особенности их возникновения и дальнейшей динамики. Неоднородности совершают перемещения с околосвуковой скоростью на расстояния, превышающие радиус Земли. Между тем построение геофизической картины в смысле причины возникновения отдельных явлений, характеризуется рядом трудностей. Достаточно сказать, что теория формирования неоднородностей размером более 10^6 см до настоящего времени не разработана. И то же самое можно сказать о физике землетрясений. Но следует попытаться построить последовательность гипотез, относящихся к сути проблемы. И первая из них должна относиться к геофизической схеме возникновения объекта и не когда-нибудь, а в среднем за 12 часов до главного удара. Здесь возникает гипотеза о том, что к возникновению объекта «причастны» совместные воздействия лунных и солнечных приливов. Такие явления возникают вблизи местных полудня и полуночи. Отметим, что для проверки использована клеточная структура, аналогичная месячным отчётам о величине, например, $foF2$ для конкретной АИС. Двадцать четыре вертикальных полос соответствовали часам суток и девяносто две горизонтальных полосы соответствовали летним дням конкретного года. На эту структуру наносились два вида информации. Ставились крестики, соответствовавшие дню и часу землетрясения с магнитудой $M \geq 4$ внутри квадрата со стороной 300 км с центром, совпадающим с центром Японии. А также отмечалось для данного числа и для данного времени нахождения Луны под самым высоким углом места над горизонтом. Оказалось, что дата и время землетрясения группируются в окрестностях точек пересечения лунной «траектории» с полуденными и полуночными вертикалями таблицы.

Гистограммы распределения времени землетрясения по часам суток обладают отчётливыми полуденными и полуночными максимумами.

Гораздо сложнее интерпретировать двенадцатичасовой сдвиг между началом реакции ионосферы на будущее землетрясение и моментом главного удара. Была принята гипотеза о том, что вблизи краёв материковых плит в подземной структуре накапливается два вида потенциальной энергии. Первый — это макромасштабная энергия напряжения земной коры, те самые 10^{16} эргов, для $M = 7$, которые выделяются в момент главного удара. И на порядки меньшая потенциальная энергия неупорядоченных подземных фрагментов вблизи границы плиты, которые удерживает в неустойчивом состоянии трение покоя. Совместное воздействие лунного и солнечного приливов выводит их из этого состояния. Преодоление трения покоя сопровождается разрушением кристаллических соприкасающихся поверхностей. При этом большие внутренние электрические поля кристаллов становятся внешними полями. Они попадают в ионосферу, где формируют неоднородность. Объект приходит в движение в ионосфере. А в это время подземные фрагменты тоже приходят движение. Оно длится те самые двенадцать часов, после которых происходит удар фрагмента о вертикальную границу плиты, что провоцирует собственно землетрясение.

Другое сложное для интерпретации явление представляет собой движение объекта в течение многих часов на многие тысячи километров. Высказывалось мнение, что объект представляет собой солитоноподобное образование. Но прежде чем разбирать нелинейные схемы, в которых возможно существование солитонов, следует ответить на фундаментальный вопрос. Тот локальный избыток заряженных частиц — электронов, который обнаруживается с помощью АИС, представляет собой поток или волну. Или это кажущееся движение избытка, который возникает в одном месте из одних частиц, а в другом месте из других. Необходимо оценить, какое возмущение магнитного поля возникнет при том или ином варианте движения объекта. Прямые измерения с помощью магнитометров показали, что при прохождении объекта вариация магнитного поля невелика [Алпатов и др., 2018].

И, конечно, надо синтезировать схему, в которой определяется время жизни объекта и механизм исчезновения его солитоноподобного состояния, сменяющегося диффузионной релаксацией.

ЛИТЕРАТУРА

- Алпатов В.В., Калинин Ю.К., Козлов С.И., Репин А.Ю., Щелкалин А.В. Вопросы модификации ионосферы. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ _ МЦД» 2018. 200 с.
- Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 568 с., 1979
- Данилкин Н.П., Котонаева Н.Г., Анишин М.М. Задержанный нижний след на спутниковых ионограммах – новое средство изучения макронеоднородностей ионосферы. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. т. XLIX, №1, С.9, 2006.
- Дзвонковская А.Л., Калинин Ю.К., Кузнецов В.А., Сергеенко Н.П., Васькин А.А. Нелинейные макромасштабные неоднородности в области $F2$ ионосферы Земли // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. №2–3 с. 62–66.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1989.
- Ионосферно-магнитная служба. Сборник под ред. С.И. Авдюшина и А.Д. Данилова. –Л.: Гидрометеоздат, 1987.
- Калинин Ю.К., Сергеенко Н.П. Макромасштабные движущиеся неоднородности, возникающие в ионосфере за несколько часов до сильных землетрясений. // Доклады. РАН, 2002. т.387, №1. С.105.
- Калинин Ю.К., Сергеенко Н.П., Сазанов А.В. Кругосветные движения сейсмогенных макромасштабных неоднородностей в области $F2$ ионосферы. // Геомагнетизм и аэрномия. 2004 т.44, №43, С.331.
- Калинин Ю.К. Сейсмогенные неоднородности в области $F2$ ионосферы, обнаруживаемые наземными и спутниковой ионосферными станциями // Труды ИПГ. 2010. Выпуск 89. с.166
- Сергеенко Н.П. О перемещающихся крупномасштабных неоднородностях в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 1973. Т.13. №3. с.186

- Y.K.Kalinin, N.P.Sergeenko. The large-scale isolated disturbances dynamics in the main peak of electronic concentration of ionosphere. // *Jorn. of Atmosph. and Sol.-Terr. Phys.*, 65(2003) p.1175.
- Leonard R.S., Barnes R.A. Observation in Ionospheric Disturbances Following the Alaska Earthquake.// *J.Geophys. Res.* V.70. NS. P1250, 1965.

MACRO-SCALE ISOLATED INHOMOGENEITIES MOVING IN THE REGION OF MAXIMUM ELECTRON CONCENTRATION OF THE IONOSPHERE

Y.K. Kalinin, A.Yu. Repin, E.N. Khotenko

The relative variations of the critical frequency of the region F2 of the ionosphere obtained at the world network of ground-based automatic ionospheric stations (AIS) are considered. On the basis of these data, the hypothesis of the existence in the F2 region of macroscale electron concentration inhomogeneities with horizontal dimensions of 1–3 thousand km and a lifetime of several hours is accepted. The objects can travel a distance of several thousand kilometers with transonic apparent speed. In the case of specific space-time groupings of objects, the statement about their seismogenic nature is accepted. A possible connection of the facts of registration on the satellite AIS of a special configuration of signals, so-called detained lower traces, with these phenomena is also analyzed. Geophysical hypotheses that interpret experimental data on the properties of seismogenic inhomogeneities are presented.

KEYWORDS: IONOSPHERE, F2 REGION, INHOMOGENEITIES, MACROSCALE, EARTHQUAKE, SATELLITE, DELAYED LOWER TRACE.