

УДК 550.388.1+550.34.06

Оценки возмущений орбит космических аппаратов в верхней ионосфере перед сильными землетрясениями как дополнительный источник информации для Федерального центра прогнозирования землетрясений МЧС России

Тертышников А.В., Скрипачев В.О. (skripatchevv@inbox.ru)

Академия гражданской защиты МЧС России

Estimations of disturbances of satellites orbits in upper ionosphere before strong earthquakes as an additional source of the information for the Federal center of forecasting of earthquakes of the EMERCOM of Russia

Tertyshnikov A.V., Skripachev V.O. (skripatchevv@inbox.ru)

Представлена информация о дополнительном источнике данных о планетарном сейсмическом риске на основе данных радиотехнических наблюдений за движением космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) на низких орбитах.

Приведены оценки характеристик торможения КА с высотой орбиты 450-540 км и с высотой орбиты 700-900 км до и после сильных (с магнитудой $M \geq 6.5$) коровых землетрясений 2000-2006 гг. Методика оценки сейсмоорбитальных эффектов представлена на примере малого КА Можаяц-4. За две недели до землетрясений нарастают вариации торможения низкоорбитальных КА. За 3-6 суток до сильных коровых землетрясений с эпицентрами на суше торможение низкоорбитальных КА в верхней атмосфере усиливается. Эффект увеличения вязкости нейтральной компоненты атмосферы на высотах КА за 3-6 суток до сильных коровых землетрясений согласуется с результатами исследований возмущений вариаций плотности ионизации в F-области ионосферы перед землетрясениями. В сутки землетрясения аномалий не обнаружено.

Для диагностики сейсмоорбитальных эффектов и возмущений верхней атмосферы в будущем предлагается использовать элементы космического мусора.

The information on an additional source of data on planetary seismic risk on the basis of the given radio engineering supervision over movement of remote sensing satellites in low orbits is given.

Estimations of characteristics of braking satellites with orbit height 450-540 km and with orbit height 700-900 km before and after strong (with magnitude $M \geq 6.5$) crust earthquakes 2000-

2006 years. The technique of an estimation seismoorbital effects is presented on an example small satellite «Mozhaets-4». For two weeks before earthquakes increasing variations of braking low orbital satellites. Prior 3-6 days before strong crust earthquakes with epicentres on a land braking low orbital satellites in the upper atmosphere is amplifies.

The effect of increase in viscosity neutral components of atmosphere at satellites orbits prior 3-6 days before strong crust earthquakes will be coordinated with results of researches of disturbances of variations of density of ionization in F-layer of an ionosphere before earthquakes. In day of earthquake of anomalies it is not revealed.

For diagnostics seismoorbital effects and disturbances of upper atmosphere in the future it is offered to use space debris.

Введение

В «Концепции развития системы космического мониторинга чрезвычайных ситуаций (СКМ ЧС)» МЧС РФ (2008 г.) определены взгляды на использование космической информации при прогнозировании и ликвидации землетрясений. При этом, основное внимание предлагается уделить сбору данных наблюдений от грунтовых и подводных датчиков в сейсмоопасных регионах. Много внимания уделяется сбору вспомогательной информации о последствиях землетрясений по снимкам высокого разрешения и с помощью интерферометрических методов космической радиолокационной съемки.

В России для мониторинга сейсмического риска создана Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений, объединяющая специальные системы и службы наблюдений за состоянием окружающей среды различных министерств и ведомств. Прогнозирование сейсмических условий организовано на базе Федерального центра прогнозирования землетрясений (ФЦПЗ) – рис. 1.

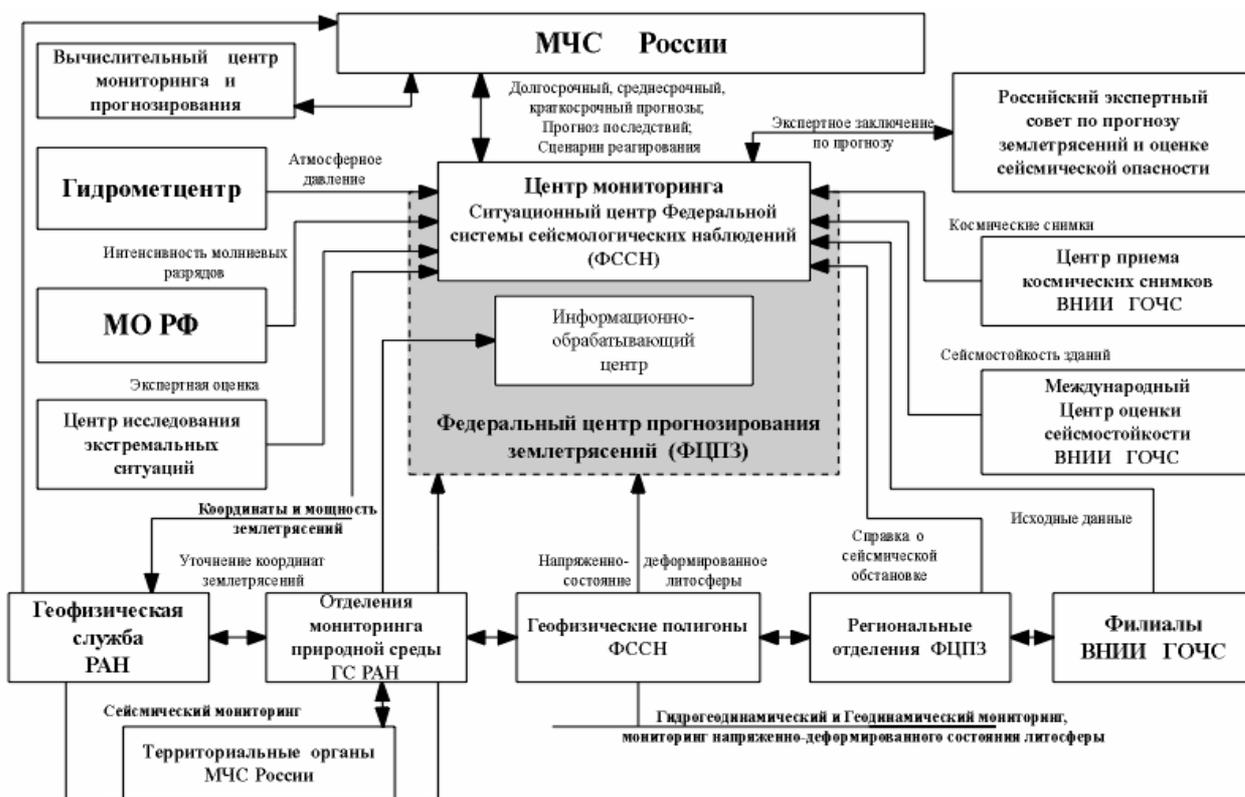


Рис.1 – Схема организации российского мониторинга и прогнозирования землетрясений

Прогнозы землетрясений в ФЦПЗ разрабатываются по результатам анализа данных о состоянии геофизических полей четырех основных сейсмоактивных регионов России: Северного Кавказа (от Дагестана до Черноморского побережья), Прибайкалья, Камчатки и Дальнего Востока. Не остается без внимания сейсмический режим приграничных территорий. Активно используются возможности аэрокосмического мониторинга состояния геосфер. Получаемая информация используется для уточнения существующих и разработки новых технологий мониторинга сейсмического режима.

В технологии мониторинга сейсмической активности в ФЦПЗ предусмотрен предварительный анализ структуры разломов литосферы сейсмоактивных регионов, данных сейсмического районирования и общих тенденций сейсмической опасности. На среднесрочном этапе (за месяцы до землетрясения) определяются наиболее информативные предвестники в заранее выделенных потенциально сейсмоопасных районах. Полученные

результаты уточняются на краткосрочном этапе за сутки-недели до землетрясения на основе регулярной и оперативной диагностики краткосрочных предвестников. При появлении угрозы землетрясения собирается Экспертный Совет по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности, где ведущие сейсмологи России принимают окончательное решение о степени сейсмической опасности. Возникающие при этом проблемы связаны со сложностью сравнения успешности используемых технологий прогнозирования, а также с оптимальным использованием космических данных сейсмического мониторинга.

Современное состояние системы космического мониторинга ЧС обуславливает поиск новых источников информации о сейсмических рисках. Одним из них может быть информация наземных радиотехнических средств об орбитальном движении КА, в котором проявляются предвестниковые эффекты сильных землетрясений.

Предвестниковые эффекты землетрясений на различных высотах в атмосфере проявляются в вариациях параметров как заряженной компоненты, так и в вариациях нейтральной компоненты [1, 2]. В верхней атмосфере за несколько суток до землетрясений наблюдались возмущения электронной плотности и температуры заряженных частиц [2, 3]. Так, в [4-7] для землетрясений с магнитудой $M > 5.5$ в Японии критическая частота $F2$ -слоя ионосферы ($foF2$) в дневное время увеличивалась за 3-7 дней до землетрясения, а затем уменьшалась за сутки-двое до толчка. Сейсмоионосферные эффекты обычно проявлялись на расстояниях до 500 км от эпицентров.

По данным сигналов навигационных КА системы GPS ионосферные эффекты землетрясений обнаружены при исследовании полного электронного содержания (ТЕС – Total Electron Content) в атмосфере. При этом, основной вклад в ТЕС вносят электроны F-области ионосферы.

В [8-10] было показано, что за 1-7 дней перед сильными

землетрясениями наблюдается увеличение изменчивости ТЕС на несколько процентов, если точка наблюдения расположена в области подготовки землетрясений. А в [11, 12] изменения ТЕС над сейсмоопасным регионом перед сильным землетрясением оценены в десятки процентов.

Перед землетрясениями также меняются характеристики нейтральной атмосферы [13], в том числе и в верхней ионосфере, где проходят орбиты космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Учитывая различия в проявлении возмущений ионосферы над сейсмоопасным регионом перед землетрясением по данным наземных станций ионосферного зондирования и по данным просвечивания атмосферы сигналами навигационных КА, можно предположить существование возмущений атмосферы выше F2-слоя ионосферы. Причем, эти эффекты могут проявиться в характеристиках орбитального движения космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в верхней ионосфере.

Для поиска предвестников землетрясений в верхней ионосфере предлагается использовать данные наблюдений за характером орбитального движения КА. Предварительные результаты исследования характеристик орбитального движения КА в связи с проблемой литосферно-ионосферных связей получены в [1].

Наблюдения за характеристиками торможения КА ДЗЗ регулярно проводятся наземными радиотехническими комплексами. При этом, рассчитываются оценки баллистического коэффициента K_b [1]:

$$K_b = \frac{C_x S}{2m}, \quad (1)$$

где m – масса КА, C_x – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления, S – характерная площадь КА.

Проектные значения K_b рассчитываются еще до запуска КА при моделировании силы аэродинамического сопротивления КА:

$$F = K_b \rho V_{отн}^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность атмосферы на высоте КА, скорость которого относительно воздуха $V_{отн} = V - W$, где V – скорость КА в геоцентрической инерционной системе координат, W – скорость движения атмосферы (ветра).

Вариации наблюдаемых оценок K_b относительно проектных отражают изменения плотности и вязкости атмосферы на орбитах КА. Возможные корректировки орбиты КА или их вращение налагают дополнительные ограничения на выбор исходных данных, которые предполагается использовать при оценивании вариаций торможения КА в сейсмоопасные периоды времени относительно сильных землетрясений.

Порядок обработки исходных данных

Наблюдаемые оценки значений K_b функционирующих в околоземном космическом пространстве (ОКП) КА определяются, например, американской системой контроля космического пространства (Space Surveillance Network, SSN) и доступны в Интернете по адресу <http://www.space-track.org>. Там они представлены в рядах элементов орбит в форме «Two line elements» (TLE). В архивах для каждых суток имеется до 4 оценок K_b различных КА.

Оценки K_b подвержены существенным сезонным вариациям. Поэтому, для оценки существования сейсмогенных возмущений верхней ионосферы, а именно этот вопрос активно дискутируется, необходимо оценить хотя бы основные тенденции в изменении обобщенных оценок K_b . Различная высота орбит функционирующих до настоящего времени КА ДЗЗ позволяет оценить положение источника возмущений верхней ионосферы перед сильными землетрясениями, а также отклик верхней атмосферы на само сотрясение земной поверхности.

Для проведения исследований были отобраны 10 КА: *Монитор-Э* (масса $m=750$ кг), *Quickbird* (1028 кг), *EROS-1A* (250 кг), *OrbView-3* (300 кг), *SPOT-5* (3000 кг), *Terra* (4800 кг), *Aqua* (2934 кг), *Landsat-7* (2200 кг), малый КА *Университетский (Татьяна)* (23 кг) и малый КА *Можаяц-4* (64 кг). Высота

их солнечно-синхронных орбит не превышает 1000 км, кроме КА *Татьяна*.

Отбор сейсмических событий – сильных коровых землетрясений (с магнитудой $M > 6.5$, глубиной гипоцентра $z < 30$ км; с ними связаны наибольший ущерб и жертвы) осуществлялся по данным National Earthquake Information Center (<http://eqint.cr.usgs.gov/neic>). Землетрясения разделялись на события с эпицентрами на суше и на события с подводными эпицентрами. Это обусловлено результатами предварительных исследований, где было установлено, что в течение 2-3 недель до большинства сильнейших подводных землетрясений 2000-2006 гг. с глубиной гипоцентра z не более 30 км не проявилось статистически значимых на фоне естественных вариаций среднесуточных вариаций орбиты КА ДЗЗ [4]. Исключением было катастрофическое цунамигенное Суматра-Андаманское мегаземлетрясение 26.XII.2004 г., перед которым были выявлены явные предвестниковые эффекты увеличения торможения ряда КА. Однако процессы подготовки этого землетрясения проявились на огромных территориях суши.

Продолжительность наблюдений за оценками K_b была определена в 31 сутки: 20 суток до и 10 суток после каждого землетрясения. Отрезки наблюдений не пересекались. При формировании массивов с данными использовался интервал 2003-2006 гг. с низкой солнечной активностью и достаточно спокойными магнитными условиями. В это время на выбранных отрезках наблюдения не было выявлено статистически значимых связей между магнитной возмущенностью и вариациями орбит.

Для повышения однородности анализируемых архивных рядов оценок K_b использовались их среднесуточные оценки, которые, в свою очередь, переводились в типизированные оценки: среднесуточной оценке присваивалось значение $K_b' = 1$, если в предыдущие сутки значение оценки среднесуточного баллистического коэффициента было меньше, чем в анализируемые сутки. В остальных случаях использовалось $K_b' = 0$. Таким образом, анализировались ряды данных с нулями и единицами.

Для типизированных рядов K_b^t по всем КА и для каждого суток выбранного интервала наблюдений оценивалась оценка математического ожидания $\langle K_b^t \rangle_i$, $i=-20\dots+10$ суток. Набор оценок $\langle K_b^t \rangle_i$ для каждого суток выбранного временного ряда наблюдений позволяет исследовать «обобщенный портрет» [1, 13] тенденций торможения КА относительно момента сильного корового землетрясения.

Кроме этого, для каждого КА с помощью быстрого преобразования Фурье в «скользящем окне» с шириной в 16 суток рассчитывались массивы периодограмм мощности вариаций типизированных оценок K_b^t , которые из практических соображений присваивались правой границе окна. По массивам периодограмм для каждого КА оценивались характеристики осредненной по всем землетрясениям периодограммы.

Аналогичные расчеты проводились для каждого КА по «фоновым» вариациям на основе 50 случайно выбранных отрезков наблюдений за оценками K_b^t за 2003-2006 гг. Полученные при этом оценки использовались для сравнения и диагностики предвестниковых эффектов в вариациях типизированных оценок K_b^t .

Оценки сейсмоорбитальных эффектов

В качестве примера проявления сейсмоорбитальных эффектов на рис.2 для КА *Можгаец-4* (высота орбиты 680 км) представлены осредненные для каждого суток выбранного временного отрезка оценки $\langle K_b^t \rangle_i$ по 11 сильнейшим коровым землетрясениям суши 2003-2006 гг. с $M>6.5$ (табл.1).

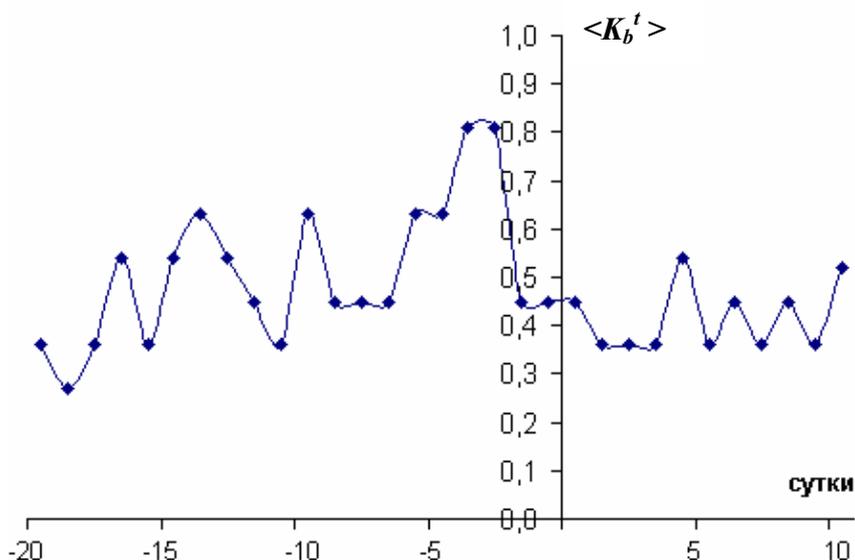


Рис.2 – Осредненные по 11 сильнейшим коровым землетрясениям суши 2003-2006 гг. с $M > 6.5$ оценки $\langle K_b^t \rangle$, для КА Можеец-4. 0 – сутки с землетрясением

Таблица 1. Характеристики землетрясений

№	Дата	Широта, φ	Долгота, λ	Глубина гипоцентра, Z	Магнитуда, M
1	26.XII.2003	29.00	58.31	10	6.80
2	28.VIII.2004	-35.17	-70.53	5	6.50
3	15.XI.2004	4.70	-77.51	15	7.20
4	22.II.2005	30.75	56.82	14	6.50
5	05.XII.2005	-6.22	29.83	22	7.20
6	20.III.2005	33.81	130.13	10	6.70
7	08.X.2005	34.54	73.59	26	7.70
8	04.I.2006	28.16	-112.12	14	6.70
9	22.II.2006	-21.32	33.58	11	7.50
10	20.IV.2006	60.95	167.09	22	7.60
11	22.V.2006	60.77	165.74	16	6.70

Общая тенденция роста торможения на рис. 1 проявляется на протяжении 2-3 недель до землетрясения и достигает максимума за трое суток до землетрясения. Накануне землетрясения характеристики тенденции торможения уменьшаются до фоновых значений.

Функция распределения анализируемой выборки $\langle K_b^t \rangle_i$ за 3-4 суток до землетрясения статистически значимо (по критерию Вилкоксона с $p < 0.05$, [14]) отличается от функция распределения фоновой выборки. В непараметрической статистике двухвыборочный критерий Вилкоксона (Манна-Уитни) применяется для малых выборок при проверке гипотезы о параметре выборочного распределения $H_0 : P(X < Y) = 1/2$, где X – случайная величина, распределенная как элементы первой выборки, а Y – второй [14].

Для тяжелых КА с массой свыше 1000 кг тенденции повышенного торможения оказались в пределах фоновых вариаций. По-видимому, инерционность тяжелых КА снижает амплитуду проявления сейсмоорбитальных эффектов, то есть, подтвердилась обратная зависимость силы аэродинамического сопротивления от массы КА в (2).

Для анализа вариаций $\langle K_b^t \rangle_i$ с помощью быстрого преобразования Фурье в скользящем окне шириной 16 суток была увеличена заблаговременность анализируемых рядов с данными K_b^t на 16 суток. На рис. 2 приведены результаты расчета обобщенных периодограмм для КА *Можгаец-4* с линейной интерполяцией между среднесуточными оценками. Рассчитанные периодограммы присваивались правой границе окна. Ограничение анализируемых на рис. 3 периодов обусловлено особенностями метода быстрого преобразования Фурье.

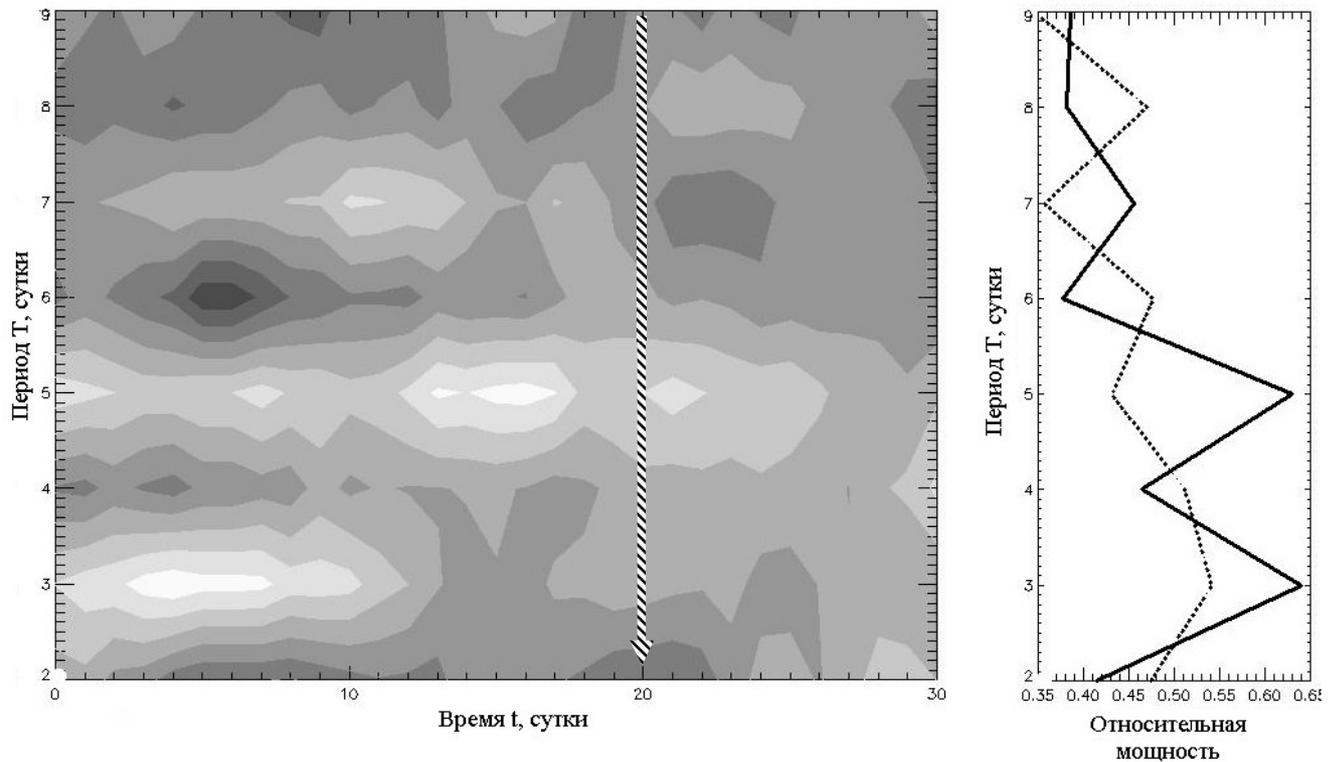


Рис. 3 – Характеристики обобщенной спектрально-временной диаграммы мощности вариаций типизированных оценок торможения КА Можаяц-4:

- а) обобщенная спектрально-временная диаграмма относительной мощности вариаций среднесуточных оценок K_b^t ; стрелка – момент землетрясения в 20 суток;
 б) осредненные оценки относительной мощности гармоник: кривая 1 – до землетрясения (на отрезке 20 суток), кривая 2 – после землетрясения (на отрезке 9 суток).

Перед землетрясением повышенная мощность вариаций анализируемых тенденций торможения КА проявляется практически на всех периодах. При этом максимум мощности при приближении к землетрясению сдвигается с $T=5$ суток за 20 суток до землетрясения на $T=4$ суток за 2-3 суток до землетрясения. Проявляется также тенденция уменьшения мощности низких частот (рост размеров темного пятна для периода $T=7-8$ суток) перед землетрясением.

Относительная мощность гармоник с периодами $T=3-4$ суток несколько увеличивается в интервал времени ± 5 суток от землетрясения.

В ряде случаев даже для некоторых легких КА не было зафиксировано

значимых вариаций орбиты перед сильным коровым землетрясением. Возможно это обусловлено особенностями подготовки землетрясений в различных регионах мира.

В дальнейших исследованиях необходимо увеличивать статистику наблюдений и количество используемых КА ДЗЗ, элементы космического мусора, в который, в итоге, превращаются элементы КА. Постоянные наблюдения за орбитами элементов космического мусора и изменениями спектра его размеров можно попытаться использовать для наблюдений морфологии возмущений среды ближнего ОКП.

Исследование особенностей проявления сейсмоорбитальных эффектов по высоте проводилось по двум группам КА, условно разделенных на среднеорбитальные (700-900 км) и низкоорбитальные КА (450-540 км). В состав среднеорбитальной группы были включены 4 КА: *Aqua* (705 км), *Landsat-7* (705 км), *SPOT-5* (822 км), *Terra* (705 км). В другую группу КА были включены: *EROS-1A* (480 км), *Монитор-Э* (540 км), *Quickbird* (450 км), *ORBVIEW-3* (470 км) (Рис. 4). Все эти КА имеют солнечно-синхронные орбиты.

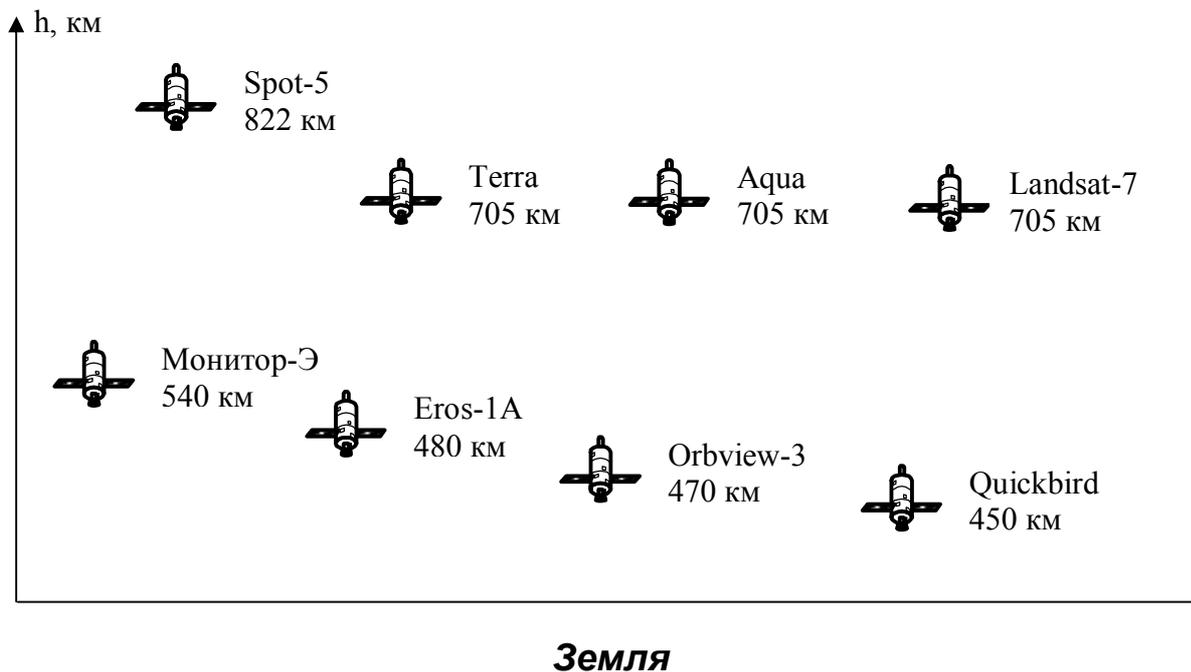


Рис. 4 – Состав среднеорбитальной и низкоорбитальной группировок КА

Для 19 сильных коровых землетрясений суши (табл. 2) были получены оценки коэффициентов корреляции (r) между данными наблюдений за оценками $\langle K_b' \rangle$ указанных групп КА (рис. 5).

Таблица 2 – Характеристики землетрясений

№	Дата	Широта, φ	Долгота, λ	Глубина гипоцентра, Z	Магнитуда, M
1	17.VI.2000	63.97	-20.49	10	6.80
2	04.VIII.2000	48.79	142.25	10	7.10
3	06.X.2000	35.46	133.13	10	7.40
4	06.XII.2000	39.57	54.80	30	7.50
5	14.XI.2001	35.95	90.54	10	8.00
6	03.II.2002	38.57	31.27	5	6.50
7	22.VI.2002	35.63	49.05	10	6.50
8	08.IX.2002	-3.30	142.95	13	7.80
9	23.X.2002	63.51	-147.91	4	6.70
10	21.V.2003	36.96	3.63	12	6.90
11	27.IX.2003	50.04	87.81	16	7.50
12	28.VIII.2004	-35.17	-70.53	5	6.50
13	15.XI.2004	4.70	-77.51	15	7.20
14	22.II.2005	30.75	56.82	14	6.50
15	05.XII.2005	-6.22	29.83	22	7.20
16	08.X.2005	34.54	73.59	26	7.70
17	22.II.2006	-21.32	33.58	11	7.50
18	20.IV.2006	60.95	167.09	22	7.60
19	22.V.2006	60.77	165.74	16	6.70

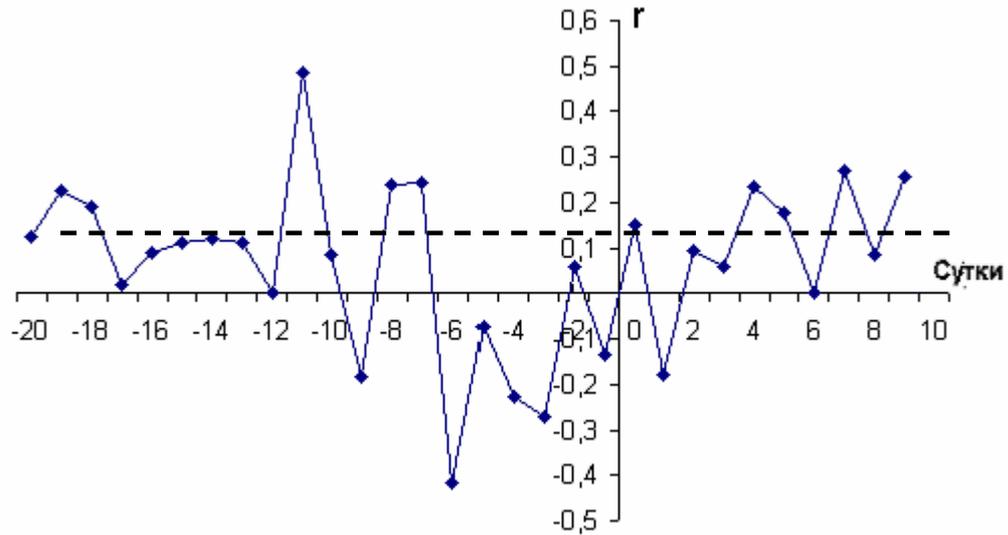


Рис. 5 – Оценки коэффициента корреляции r между оценками K_b^t среднеорбитальных и низкоорбитальных КА (пунктир – среднее фоновое значение коэффициента корреляции).

Статистически значимым по критерию χ^2 [14] при уровне значимости $p \leq 0.05$ оказался выброс коэффициента корреляции за 6 суток до землетрясения. Аномальная величина коэффициента корреляции за 3–6 суток до землетрясения обусловлена активизацией торможения низкоорбитальных КА из-за возникновения возмущений нейтральной компоненты верхней атмосферы, связанных с процессами подготовки землетрясений. В то же время, не наблюдается усиления торможения среднеорбитальных спутников.

Эффект увеличения вязкости нейтральной компоненты за 3-6 суток до сильных коровых землетрясений сильнее для низкоорбитальных спутников, чем для среднеорбитальных. Увеличение вязкости на высотах 450-540 согласуется с увеличением возмущений плотности ионизации в F-области ионосферы перед землетрясениями. Увеличение $foF2$ перед несколькими сильными землетрясениями было отмечено в работах [5-8, 15].

Можно предположить, что в F-области за 3-6 дней преобладают редкие импульсные эпизодические процессы подъема вверх нейтральной компоненты за волновых возмущений атмосферы, инициированных снизу, и, с другой стороны, за счет возмущений электрического поля. Процессы подъема

приводят к увеличению эффективной вязкости на высоте орбиты спутника, а также к уменьшению рекомбинации и, соответственно, плотности плазмы в максимуме слоя, т.е. к увеличению f_oF2 .

К моменту землетрясения частота возмущений различной природы возрастает, вероятны пульсации выбросов радона в атмосферу, приводящие к увеличению проводимости и вертикального тока атмосфере [8], увеличивается нагрев, вязкость нейтральной компоненты уменьшается.

После землетрясения коэффициент корреляции восстанавливается до среднестатистических значений. Сам момент землетрясения не проявляется в вариациях коэффициента корреляции характеристик торможения низко- и среднеорбитальных КА.

Выводы

За две недели до сильных коровых землетрясений начинает проявляться повышенное торможение низкоорбитальных КА. Можно предположить, что этот эффект обусловлен возмущениями верхней атмосферы в процессе подготовки землетрясения.

За 3-6 суток до сильных коровых землетрясений с эпицентрами на суше торможение низкоорбитальных КА в верхней атмосфере усиливается. Создается впечатление «подныривания» – резких потерь высоты низкоорбитальных КА перед землетрясениями. Эффект увеличения вязкости нейтральной компоненты за 3-6 суток до сильных коровых землетрясений согласуется с результатами исследований возмущений вариаций плотности ионизации в F-области ионосферы перед землетрясениями, что позволяет предположить общую причину, казалось бы разных возмущений. Важно, что после землетрясения характеристики торможения КА восстанавливаются, также как и характеристики плотности ионизации максимума F2 слоя, полученные при вертикальном зондировании.

Для 19 сильных коровых землетрясений с эпицентрами на суше

получены оценки коэффициентов корреляции между тенденциями торможения 4-х среднеорбитальных и 4-х низкоорбитальных КА. Статистически значимое уменьшение коэффициента корреляции за 6 суток до землетрясения может быть связано с процессами подготовки землетрясения. После землетрясения величина коэффициента корреляции восстанавливается до среднестатистических значений. В сутки землетрясения никаких аномалий не обнаружено.

Для дальнейших исследований сейсмоорбитальных эффектов представляется полезным оценить вариации энтропии характеристик космического мусора в ОКП в сейсмоопасные периоды времени.

Наблюдения за сейсмоорбитальными эффектами могут быть использованы в системе ФЦПЗ МЧС России при мониторинге сейсмических рисков.

Авторы выражают огромную благодарность за полезные советы О.В. Яковлеву и А.В. Безвесильному.

Список литературы

1. Тертышников А.В. Вариации торможения космического аппарата «Монитор-Э» перед сильными землетрясениями 2005-2006 гг.// Исследования Земли из космоса. 2004, № 5.
2. Липеровский В.А. Мейстер К.-В., Липеровская Е.В., Похотелов О.А. Модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями//Геомагнетизм и Аэрономия, 2008, № 4. С. 54.
3. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000.
4. Liperovskaya E. V., Parrot M., Bogdanov V. V., Meister C.-V., Rodkin M. V., and Liperovsky V. A. On variations of foF2 and F-spread before strong earthquakes in Japan// Natural Hazard and Earth System Sciences, 2006. № 6. P. 735-739.
5. Липеровская Е.В., Липеровский В.А., Похотелов О.А. Родкин М.В. О возмущениях в F области ионосферы перед землетрясениями// Геофизические исследования: сб.науч.тр. ред. Глико А.О./Институт физики Земли РАН.– М.: ИФЗ РАН, 2006. Вып. 6. С. 51-58.
6. Липеровская Е.В., Богданов В.В., Родкин М.В., Мейстер К.-В., Силина А.С., Мандрикова О.В. Статистический анализ возмущений критической частоты foF2 ионосферы за несколько суток до и после землетрясений по материалам станций «Петропавловск-Камчатский» и «Токио»// Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 14–17 авг. 2007 г.: сб. докл. – Петропавловск-Камч.: ИКИР ДВО РАН, 2007. С. 378-384.
7. Liperovskaya, E.V., Biagi, P.-F., Meister, C.-V., Rodkin, M.V. foF2 seismo-ionospheric effect analysis: actual data and numerical simulation EGU2008-A-02296
8. Pulinet S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes. Springer. Berlin. Heidelberg. New-York, 2004. 315 p.

9. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulinets S.A., Yu S.B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements// Ann. Geophysicae. 2004, V. 22. 1585–1593.
10. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И. Морфология и динамика изолированных ионосферных неоднородностей по данным сети GPS//Солнечно-земная физика. 2002, Вып. 3 С.50-60.
11. Захаренкова И.Е., Шагимурагов И.И., Кранковски А., Лаговский А.Ф. Ионосферные аномалии, наблюдаемые в GPS TEC измерениях перед землетрясением в Греции 8 января 2006 г. (M=6.8)// Электронный журнал "Исследовано в России", 2006. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/110.pdf>.
12. Бондур В., Смирнов В. Мониторинг вариаций ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясений по данным спутниковых навигационных систем / 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20-24, 2005, Saint Petersburg, Russian Federation.
13. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000.
14. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
15. Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмоионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе//Геомagnetизм и Аэрoномия. 2005, Т.45. № 5. С. 665-671.

Тертышников Александр Васильевич

Скрипачев Владимир Олегович