# Особенности взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений

### В. М. Костин, Г. Г. Беляев, О. Я. Овчаренко, Е. П. Трушкина

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, 108840, Россия E-mails: kostin@izmiran.ru, belyaev@izmiran.ru, ovol99@mail.ru, elena@izmiran.ru

На основании измерений параметров ионосферной плазмы, выполненных с помощью спутника «Космос-1809», а также данных наземных станций сейсмического контроля и центров предупреждения тайфунов показана тесная взаимосвязь между возникновением сильных литосферных землетрясений и зарождением, развитием и интенсификацией тропических циклонов (ТЦ). На примере ТЦ «Гарри» (1989) подробно рассмотрено изменение географии и глубины сильных землетрясений при прохождении ТЦ о. Новая Каледония. Предложены два спусковых механизма воздействия тропических циклонов на литосферные землетрясения. Показано, что акустическое воздействие землетрясений и подземных ядерных взрывов в сентябре 1992 г. на тропические возмущения вызвало развитие цепочки из 11 ТЦ. Для объяснения взаимных корреляционных связей аномальных параметров ионосферы с мощными источниками воздействия на атмосферу рассмотрены упрощённые физические модели. На основании полученных результатов делается вывод, что достоверный и предсказательный мониторинг опасных явлений на Земле должен сочетать космические системы дистанционного зондирования Земли, спутники, измеряющие параметры плазмы ионосферы и солнечного ветра, а также наземные системы, осуществляющие наблюдение за выполнением договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний.

Ключевые слова: тропические циклоны, землетрясения, спутник «Космос-1809», верхняя ионосфера

Одобрена к печати: 28.01.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139

### Введение

Аномальные события на поверхности Земли возникают при перераспределении энергии из областей, где происходит максимум поглощения излучения Солнца, солнечного ветра и энергии радиоактивного распада в земных недрах. Наиболее мощные — тропические циклоны, магнитные бури и землетрясения, а также техногенные — атомные взрывы. Все эти процессы отражаются в ионосфере (Данилов и др., 1987).

Структура и динамика верхней ионосферы изучалась со спутников аппаратурой радиозондирования — ионозондами. В нашей стране такой ионозонд работал на спутнике «Интеркосмос-19». Его результаты широко обсуждались ранее в работах (Ижовкина и др., 1996; Карпачев и др., 2015; Karpachev et al., 2013), а в настоящее время — на ежегодных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» в докладах А.Т. Карпачева.

Для решения задач Росгидромета был запущен спутник «Космос-1809» — копия спутника «Интеркосмос-19». Однако основная задача — построение профилей верхней ионосферы — решалась только в первой половине 1987 г. После исчерпания ресурсов ионосферной станции ИС-338 диагностическая аппаратура включалась под научные программы Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (Авдюшин и др., 1993) и Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН).

Так как сотрудники ИЗМИРАН получили диплом за обнаружение со спутника эффектов воздействия землетрясений на ионосферу (Мигулин и др., 1985), то было принято решение проверить возможность контроля со спутника проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в ходе совместных советско-американских экспериментов (Беляев, Костин, 2015; Беляев и др., 2010; Костин, Мурашев, 2002). После успешного выполнения задачи спутник «Космос-1809» включался в режиме мониторинга источников мощного воздействия на ионосферу до мая 1993 г.

Теоретические работы (Aburjania, 2011; Aburjania et al., 2013), в которых было показано, что сильное акустическое воздействие на возмущённые структуры в атмосфере при учёте неоднородного стратосферного ветра и магнитного поля могут приводить к формированию как отдельного вихря, так и цепочки вихревых структур, стимулировали дополнительные исследования корреляционных связей ПЯВ с другими мощными естественными источниками по данным спутника «Космос-1809».

Акустическое воздействие американских ПЯВ на тропические возмущения (ТВ) в сентябре 1992 г. привело к возникновению цепочки из 10 тропических циклонов (ТЦ) (Костин и др., 2021; Kostin et al., 2019), а в июне 1992 г. вызвало взрывное усиление трёх ТВ около американского континента. Дальнейшая интенсификация урагана «Селия» (*анел.* Celia), сопровождавшаяся усилением КНЧ-колебаний (крайне низкие частоты), которые были зарегистрированы со спутника «Космос-1809», вызвала коровое землетрясение в Ландерсе (*анел.* Landers) 27 июня 1992 г. (Костин и др., 2020). Такой механизм воздействия ураганов на землетрясения подробно изучался с помощью специальных датчиков на ~2800 сейсмостанциях США в течение более 10 лет (Fan et al., 2019).

Акустическое воздействие французских ПЯВ на ТВ в Тихом океане (ноябрь 1990 г.) вызвало развитие трёх взаимодействующих супертайфунов (Kostin et al., 2020; Pokhil et al., 2013). Резкие изменения давления в центрах тайфунов на тектонические плиты (спусковой механизм) вызвали серию сильных литосферных землетрясений.

Корреляционные связи литосферных землетрясений на различных разломах при развитии сильнейшего за 35 лет тайфуна «Гей» (*англ*. Gay) (1992) (наблюдался со спутника «Космос-1809») обсуждались в докладе на конференции Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (Kostin et al., 2021).

В настоящей работе в дополнение к ранее полученным авторами результатам рассмотрено не только торможение большим о. Новая Каледония ТЦ «Гарри» (*англ*. Harry) (1989) (Isaev et al., 2010; Kostin et al., 2015), но и обратная задача — два спусковых механизма воздействия ТЦ «Гарри» на литосферные землетрясения.

### Воздействие тропического циклона «Гарри» на ионосферу

Траектория спутника «Космос-1809» в феврале 1989 г. на нисходящих витках проходила около полуночного меридиана. В это время (9–10 февраля) поверхностный ветер в ТЦ «Гарри» (максимум ветра в области радиуса  $R \approx 1^{\circ}$  (~110 км) с центром в глазе ТЦ, усреднённый за 1 мин) усилился до ~60 м/с (Plante, Guard, 1989). Тропический циклон приближался к о. Новая Каледония, протяжённость которого составляет ~400 км. Вдоль острова тянется горная гряда высотой до 1600 м. Характеристики ТЦ брались из отчёта (Plante, Guard, 1989).

Со спутника «Космос-1809» 10 февраля наблюдались характерные возмущения в ионосфере (Isaev et al., 2010). На *рис. 1* (см. с. 127) приведены данные регистрации плотности электронов плазмы N<sub>e</sub>.

Выделяются следующие особенности:

1. Проекция в 00:40 LT (*англ*. Local Time, местное время) (13:56 UT, *англ*. Universal Time, всемирное время) центра широкого max  $N_e$  по магнитному полю на широту глаза ТЦ «Гарри» достигает высоты 200–220 км.

2. Дополнительный узкий пик N<sub>e</sub> шириной ~400 км наблюдается на широте центра ТЦ.

3. Пространственный период флуктуаций N<sub>е</sub> внутри пика в два раза меньше, чем вне его.

При прохождении ТЦ о. Новая Каледония структура возмущений в ионосфере резко изменилась (Kostin et al., 2015). Стрелками на *рис. 2* (см. с. 127) отмечены основные структурные образования. Цифры соответствуют *L*-оболочкам:

 $L = 1,23 - \max N_e$ , проецирующийся по магнитному полю на высоту (данная *L*-оболочка проходит на высоте) h = 200-230 км над ТЦ;



Рис. 1. Формирование пика плотности плазмы в зените над глазом ТЦ «Гарри»



Рис. 2. Модификация плазмы ночной ионосферы при похождении ТЦ «Гарри» о. Новая Каледония

L=1,65-центр дополнительного пика $N_{\rm e}$ шириной ~800 км;

L = 1,48 — проекция на широту центра ТЦ, где наблюдается усиление колебаний ионов Н<sup>+</sup> и He<sup>+</sup>.

Стрелками отмечено: м.э. — прохождение геомагнитного экватора, с.т. — момент входа в солнечную тень. Периодические структуры наблюдаются за плазмопаузой *L* = 4.

Особенности согласуются в модели взаимодействия ТЦ с о. Новая Каледония (Kostin et al., 2015):

1. Отклонение вращающейся структуры ТЦ от вертикали происходит из-за воздействия момента сил напора тропосферного ветра и поверхностного торможения острова.

2. Усиление ТЦ до ураганной силы происходит, если над ним формируется стратосферный антициклон, стимулирующий генерацию инфразвуковых колебаний, распространяющихся к поверхности океана и усиливающих теплообмен «океан – атмосфера».

3. Затопленная струя формируется под воздействием акустических волн грозовых разрядов, разогревающих атмосферу над облачной структурой, что приводит к эффекту линзирования. Поверхностные волны, распространяющиеся вдоль струи, обеспечивают её устойчивость. С высоты 200–230 км происходит свободный разлёт отдельных атомов.

## Воздействие тропического циклона «Гарри» на литосферные землетрясения

Развитие ТЦ «Гарри» сопровождалось серией литосферных землетрясений. На *рис. 3* на траекторию движения ТЦ нанесены моменты сильнейших землетрясений из *табл. 1*. Данные землетрясений были взяты с сайта Геологической службы США (*анел.* United States Geological Survey — USGS).



Рис. 3. Траектории спутника, ТЦ «Гарри» и моменты отдельных землетрясений (см. табл. 1)

Анализ траектории движения ТЦ «Гарри» и данных *табл. 1* указывает, что имеется три временных интервала различных воздействий ТЦ на австралийскую плиту:

- 1. До 10 февраля надо учитывать развитие тайфуна «Киррили» (англ. Kirrily) (см. рис. 5 и 6).
- 2. С 10 по 13 февраля взаимодействие ТЦ с о. Новая Каледония.
- 3. После 13 февраля воздействие области сильного разрежения ТЦ на плиту.

№	Магнитуда ( <i>M<sub>w</sub></i> )	Дата	Местонахождение	Время (UT)	Эпицентр (°с.ш./°в.д.)	Глубина, км
1	7,1	10.02.1989	Тобело, Индонезия	11:15	2,305/126,76	44,0
2	6,5	14.02.1989	Соломоновы острова	06:20	-10,45/161,37	31,9
3	6,0	19.02.1989	Порт-Орли, Вануату	12:49	-14,894/167,171	101,2
4	5,9	10.02.1989	Тобело, Индонезия	15:23	2,464/126,689	38,3
5	5,8		Никобарские острова, Индия	16:59	6,317/92,269	41,7
6	5,8		Тобело, Индонезия	20:29	2,396/126,653	33,0
7	5,8	11.02.1989	Тобело, Индонезия	01:57	2,384/126,603	65,7
8	5,7	08.02.1989	Сандвичевы острова	23:46	-55,623/-26,795	23,7
9	5,7	09.02.1989	Сандвичевы острова	02:15	-55,795/-26,527	19,8
10	5,6	07.02.1989	Папуа — Новая Гвинея	15:08	-3,381/148,809	38,0
11	5,6	09.02.1989	Сандвичевы острова	02:06	-55,748/-26,818	25,7
12	5,6	10.02.1989	Тобело, Индонезия	12:12	2,254/126,598	46,5
13	5,6		Тобело, Индонезия	12:59	2,429/126,7	33,0
14	5,6		Тобело, Индонезия	19:56	2,445/126,612	33,0
15	5,6	11.02.1989	Тобело, Индонезия	4:05	2,442/126,685	33,0
16	5,6	13.02.1989	Сарангани, Филиппины	12:15	4,987/126,915	88,4
17	5,6	14.02.1989	Порт-Вила, Вануату	14:53	-17,452/167,31	33,0
18	5,6	17.02.1989	Тернате, Индонезия	01:14	0,455/126,345	38,9
19	5,6	19.02.1989	Касукабе, Япония	12:27	35,964/139,788	60,4

Таблица 1. Сильнейшие литосферные землетрясения 7-20 февраля 1989 г.

Землетрясения в ближайшей субдукционной зоне — на Гебридских островах (*англ*. Hebrides) и в разломе о-вов Вануату (*англ*. Vanuatu) стали регистрироваться с 10 февраля. В этот день произошла большая серия сильнейших землетрясений около г. Тобело (*англ*. Tobelo, Индонезия) (см. *табл*. 1) и начались глубокофокусные землетрясения на разломе Вануату (*табл*. 2). Относительное расположение основных разломов, положения ТЦ «Гарри» и районов землетрясений приведены на *рис*. 4а. Спусковой механизм данных землетрясений представлен на *рис*. 4б. Остров Новая Каледония играет роль рычага, который под воздействием напора ветра ТЦ поднимает северо-восточный край Индо-Австралийской плиты.

Таблиц	$a^2$	Землет	пасениа	10 - 14	her	naπα	οκοπο	разлома.	и бе	петов	O-BOB	Вану	/arv
таолии	u 2.	JUMJUI	ряссния	10-140	рсв	раля	около	разлома	y UC	perob	0-808	рану	ary

N⁰	Магнитуда ( <i>M</i> <sub>w</sub> )	Дата	Местонахождение	Время (UT)	Эпицентр, (°с.ш./°в.д.)	Глубина, км
Ι	4,7	10.02.1989	106 км СЗ от г. Сола	15:23	-13,16/166,9	191,7
II	5,2	11.02.1989	39 км СВ от г. Норсуп	15:44	-15,81/167,66	148,4
III	4,7	12.02.1989	42 км СВ от г. Норсуп	10:20	-15,79/167,67	218,4
IV	4,9	13.02.1989	37 км СЗ от г. Исангел	23:13	-19,26/169,08	160,7
V	5,5	14.02.1989	100 км ЗСЗ от г. Порт-Вила	13:06	-17,42/167,43	33,0
VI	4,9		106 км ЗСЗ от г. Порт-Вила	13:18	-17,53/167,33	33,0
VII	4,8		69 км 3С3 от г. Порт-Вила	13:59	-17,59/167,68	33,0
VIII	5,6		111 км ЗСЗ от г. Порт-Вила	14:53	-17,45/167,31	33,0
IX	5,4		81 км ЗСЗ от г. Порт-Вила	17:11	-17,51/167,58	12,5
Х	4,8		48 км ЗЮЗ от г. Порт-Вила	22:48	-17,92/167,9	33,0



*Рис. 4.* Различные спусковые механизмы сброса напряжений при прохождении ТЦ о. Новая Каледония

На северном участке Индо-Австралийской плиты, под которую погружается Тихоокеанская плита (см. *рис. 4a*), силы компенсирующего момента возникают только за Филиппинской плитой — в области малых плит (см. *рис. 5*). Это привело к серии сброса напряжений на характерной глубине 33 км в районе г. Тобело (см. *табл. 1*). Более подробный анализ землетрясений  $M_w > 4,5$  показал, что серия закончилась 12 февраля в 06:00 UT ударом  $M_w = 4,6$ .

В районе о-вов Вануату она погружается под Тихоокеанскую плиту. 10 февраля, когда ТЦ развернулся и начал приближаться к острову, стал нарастать момент сил  $\mathbf{M}_f$  (см. *рис. 46*). Силы, создающие распределение компенсирующего момента на краю плиты, вызывают локальный рост напряжения внутри плиты и разрыв в слабейшей области — глубокофокусное землетрясение I (см. *табл. 2*). На следующий день 11 февраля ТЦ прошёл остров (отмечено жёлтым кругом на *рис. 46*). Распределение максимума сил компенсирующего момента сместилось к югу. Землетрясение II (см. *табл. 2*) произошло южнее (*рис. 46*).

14 февраля, когда ТЦ достаточно удалился от острова, произошла серия толчков на разломе Вануату (см. *табл. 2*). В этом случае разрежение в ТЦ приподнимает плиту, а пограничные области пытаются опуститься, но удерживаются выше расположенной плитой. Можно показать, что условие равновесия выполняется при равенстве момента сил в секторе с центром в глазе ТЦ и нейтральной точкой на границе облачной структуры ТЦ (*puc. 4в*). При достижении критического напряжения в слабейшей области происходит землетрясение. Такой механизм был предложен в работе (Kostin et al., 2020).

Особенностью совместного воздействия ТЦ «Гарри» и «Киррили» на Индо-Австралийскую плиту были сильные землетрясения Сандвической плиты ( $\mathbb{N}$  8, 9 и 11 *табл. 1*) на глубине 20–30 км. Передачу воздействия можно объяснить законом сохранения углового момента. Для вращающейся замкнутой системы из взаимодействующих литосферных плит изменение углового момента из-за поднятия плиты в области ТЦ должно компенсироваться соответствующим движением других плит. Одно из таких «слабых» мест — маленькая Сандвическая плита. Так как Сандвическая плита расположена вблизи плоскости магнитного меридиана Бразильской аномалии, где частицы радиационного пояса наиболее глубоко проникают в атмосферу, то следует ожидать дополнительных особенностей возмущений ионосферы после землетрясений. Более детальные данные были получены для событий в сентябре 1992 г. (см. *рис. 9* и *10*).

## Корреляционные связи ТЦ «Гарри» с глобальной энергетикой землетрясений

На *рис. 5* нанесены все землетрясения в восточном полушарии из *табл. 1.* Отметим, что землетрясение № 5 произошло на другой малой плите — Бирманской. Их особенности обсуждались в работе (Kostin et al., 2019). Землетрясение № 19 произошло в области сильно развитых деформационных процессов (Steblov, Stel'nikova, 2019).



Рис. 5. Траектории движения ТЦ 7-20 февраля 1989 г. и их связь с землетрясениями из табл. 1



*Рис. 6.* Интенсивность тропических циклонов и энергия литосферных землетрясений за день. Чёрточками отмечен полусуточный уровень энергии толчков: зелёная линия — при уровне меньше половины дневного; красная — выше половины дневного

Из *рис. 6* видно, что энергия литосферных землетрясений связана с развитием ТЦ. В частности, их энергия возрастает на фазе интенсификации ТЦ «Гарри», что совпадает с выводами

работы (Kostin et al., 2021), где рассматривалось воздействие на землетрясения сильнейшего за 35 лет тайфуна «Гей».

На *рис.* 6 приведены интенсивность всех ТЦ (см. *рис.* 5) в феврале 1989 г. и гистограмма логарифма от суммы энергий литосферных землетрясений за сутки в тераджоулях (ТДж).

При построении гистограммы учитывались 159 землетрясений глубиной h > 19,8 км,  $M_w > 4,5$  вычислялась по формуле (E — энергия отдельных землетрясений):

$$M_w = \frac{2}{3} (\log E - 4, 8). \tag{1}$$

### Воздействие американских ПЯВ на развитие ТЦ и землетрясения в сентябре 1992 г.

Расчёты показали, что нелинейное взаимодействие сильной акустической волны с неоднородной ионосферой может приводить к формированию как отдельных ТЦ, так и их цепочки (Aburjania, 2011; Aburjania et al., 2013). Такое поведение ТЦ наблюдалось после ряда ПЯВ. На *рис.* 7 приведена плотность плазмы на 10 нисходящих витках спутника «Космос-1809» в сентябре 1992 г. Начало первого интервала — 00:45:32 UT, длительность — 26,2 мин. Остальные интервалы повторялись через период спутника T = 104,2 мин.



*Рис.* 7. Плотность электронов на 10 пролётах спутника при проведении ПЯВ Divider, последнего из серии операции «Юлин» (*англ.* Julin) (см. *табл.* 3). Точками на траекториях 11 ТЦ показаны центры циклонов в момент пролёта спутника; звёздочками с цифрами — землетрясения 24 сентября 1992 г. с номером из *табл.* 4



*Рис. 8.* Интенсивности тропических циклонов в сентябре 1992 г.: *а* — западная часть, Тихий и Индийский океаны; *б* — восточная часть, Тихий и Атлантический океаны

В это время были произведены ПЯВ Hunters Trophy, Divider операции «Юлин» в США и Nuclear Test (NT) в Китае (*табл. 3*). После ПЯВ Hunters Trophy интенсифицировались три тропических возмущения около американского континента (*puc. 86*, см. с. 132) и сформировалась цепочка из 10 тропических циклонов (см. *puc. 7*): волна Rossby—Aburjania (Россби—Абурджания). Дополнительная энергия для формирования ТЦ поступает от стратосферного ветра (Aburjania et al., 2013). Характеристики ТЦ брались из отчёта (Mautner, Guard, 1992).

Акустическое воздействие ПЯВ Divider на ураганы в Атлантическом и Тихом океанах около американского континента резко изменило траектории их движения. На *рис*. 7 показаны эти изменения. 25 сентября NT в Китае добавил в цепочку одиннадцатый ТЦ «Авиона» (*англ*. Aviona).

Название ПЯВ	Дата, время (UT)	Эпицентр (°с.ш./°в.д.)	Мощность, кт	Магнитуда ( $M_{_W}$ )	Es/En, %
1. Hunters Trophy	18.06.1992, 17:00	37,21/-116,21	4	4,4	1,5
2. Divider	23.06.1992, 15:04	37,02/-115,99	5	4,2	0,6
3. NT, China	25.06.1992, 08:00	41,76/88,39	8	5,0	6,0

Таблица З. Характеристики ПЯВ

Оценка энергии ПЯВ (см. *табл. 3*) по формуле (1) даёт Es — энергию сейсмического удара в джоулях, а расчёт энергии через ядерный эквивалент Y (кт) (умножением на тротиловый эквивалент 1 кг ТНТ = 4,184 МДж (ТНТ — тринитротолуол)) даёт En — полную энергию ядерного взрыва в джоулях. В последней колонке приведено количество энергии взрыва в процентах, которое преобразовалось в сейсмическую энергию.

24 сентября произошло несколько землетрясений, параметры приведены в табл. 4.

Nº	Дата	Время (UT)	Эпицентр (°с.ш./°з.д.)	Магнитуда ( <i>M<sub>w</sub></i> )	Глубина, км	Место
1	23.09.1992	15:04	37,0/116,0	4,2	1,21	Невадский испытательный полигон ( <i>англ</i> . Nevada Test Site)
2	24.09.1992	00:52	-59,5/26	5,5	21,2	Район Южных Сандвичевых островов
3	24.09.1992	06:10	14,3/91,4	4,6	33,0	Гватемала
4	24.09.1992	07:48	13,7/91,1	4,6	33,0	В прибрежной зоне акватории Гватемалы
5	24.09.1992	13:22	-31/67,8	4,9	9,5	г. Сан-Хуан, Аргентина

Таблица 4. Землетрясения 24 сентября 1992 г.

Землетрясения 24 сентября связаны, скорее всего, с воздействием на литосферные плиты на фазе резкого падения интенсивности следующих ТЦ: № 2 — «Бонни» (*англ*. Bonnie), № 3 и 4 — «Рослин» (*англ*. Roslin), а № 5 (коровое) — с прохождением шельфов тропическими циклонами «Тина», «Сеймур» и «Даниэль» (*англ*. Tina, Seymour и Danielle), что соответствует работе (Fan et al., 2019).

На *рис.* 9 (см. с. 134) приведены данные спутника «Космос-1809» в момент землетрясения на Сандвической плите.

- 1. При движении спутника к очагу (59,5° ю. ш., 26,0° з. д.) наблюдались:
  - в 01:07:30 электромагнитный предвестник формирования перемещающегося ионосферного возмущения;
  - в 01:09 предвестник группы ОНЧ-колебания (очень низкочастотные);
  - в 01:10 начало солитонной группы;

- в 01:11-01:16 поднятие ионов Н<sup>+</sup> в верхнюю ионосферу (канал Н850 Гц), осцилляции *Ex, Ey*.
- 2. Данные структуры распространялись на запад вслед за терминатором. Наблюдались на тех же широтах (витки 29114–29122).



Рис. 9. Формирование солитонных структур в ионосфере в момент землетрясения № 2 (см. *табл. 4*)

Через 11 ч спутник пролетал над Сандвической плитой в утреннем секторе. Наблюдались следующие эффекты:

- 1. Над очагом землетря<br/>сения в области 2,3 < L < 4 изменения  $N_{\rm e}$  с периодом ~150 км и амплитудой до 15 %.
- В области магнитного зенита L = 1,94 три пика T<sub>e</sub> (электронной температуры) амплитудой 1500 К, совпадающие с пиками электрического поля, направленного по магнитному полю к Земле из области ураганов «Бонни» и «Чарли» (англ. Charley), которые развивались в северном полушарии вблизи этих L-оболочек.
- 3. Возмущённая область 1,64 < *L* < 2,06, которая проецируется по магнитному полю на область предстоящего через 1 ч корового землетрясения в Аргентине.
- 4. Отмечается также очень широкая область флуктуаций  $N_{\rm e}$  до 10 % над нагревным стендом Аресибо.

Данные *рис. 9* и *10* указывают, что прохождение сильной акустической волны в ионосферу в районе Бразильской аномалии может приводить к развитию в ионосфере долгоживущих квазипериодических структур. Выводы работы (Kostin et al., 2015) об источнике наблюдавшихся периодических структурах надо скорректировать.



*Рис. 10.* Возмущения в ионосфере через 11 ч после землетрясения Сандвической плиты, за час до землетрясения в Аргентине, над отдельными ураганами и СДВ-передатчиками (сверхдлинные волны). Стрелки вверх проведены при пересечении магнитного зенита источника, а вниз — сопряжённой области

### Выводы

1. Возникновение и развитие мощных источников воздействия на атмосферу — тропических циклонов и сильных литосферных землетрясений — взаимосвязаны. В области разрежения ТЦ литосферные плиты резко приподнимаются, а на краях опускаются. Происходит сброс напряжений — спусковой механизм. В свою очередь, акустическое воздействие сильных землетрясений на области тропических возмущений или на область ослабленного ТЦ может интенсифицировать их.

2. Показано, что воздействие ТЦ «Гарри» на о. Новая Каледония можно рассматривать как рычаг, который «приподнял» северо-восточный край австралийской плиты, что вызвало серию землетрясений на этом разломе.

3. Предложено рассматривать землетрясения Сандвической плиты как проявление самосогласованной реакции системы литосферных плит на удалённое воздействие ТЦ вследствие закона сохранения углового момента.

4. Прогноз возникновения землетрясений в настоящее время можно дать вероятностно (Горшков и др., 2019; Kosobokov, 2021). Развитие коровых землетрясений, сопровождающееся выходом радона, можно прогнозировать по изменению ряда геофизических параметров (Pulinets et al., 2015). В отдельных случаях восточнее разлома Сан Андреас (Калифорния) можно точно указать место и время предстоящего сильного землетрясения (Костин и др., 2020).

5. Мониторинг опасных явлений на Земле должен сочетать космические системы дистанционного зондирования Земли, спутники, измеряющие параметры плазмы ионосферы и солнечного ветра, а также наземные системы контроля выполнения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний 1996 г.

Глубокая благодарность П. И. Шебалину и Г. М. Стеблову за обсуждение на конференции, посвящённой 100-летию академика В. И. Кейлис-Борок, вероятности землетрясений в областях с наибольшим развитием деформационных процессов и за предположение, что воздействие ТЦ на литосферные плиты — один из возможных спусковых механизмов землетрясений. Авторы также благодарят О. Ю. Лаврову, пригласившую принять участие в 19-й конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», за содействие в представлении презентации, по материалам которой подготовлена настоящая статья.

### Литература

- 1. Авдюшин С. И., Ветчинкин Н. В., Козлов С. И., Петров Н. Н., Романовский Ю. А. Программа «Активные эксперименты и антропогенные эффекты в ионосфере»: организация, аппаратно-методическое обеспечение, основные результаты исследований // Косм. исслед. 1993. Т. 31. № 1. С. 3–25.
- 2. *Беляев Г. Г., Костин В. М.* Проявление мощных естественных и антропогенных процессов в ионосфере и на Земле // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: юбилейный сб. ИЗМИРАН-75. 2015. С. 170–184.
- 3. *Беляев Г. Г., Костин В. М., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я.* Вариации параметров плазмы верхней ионосферы после подземных ядерных испытаний // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: сб. докл. 5-й Международ. конф. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2010. С. 342–348.
- 4. *Горшков А. И., Соловьев А.А., Шебалин П. Н.* К 30-летию ИТПЗ РАН. 2019. 64 с. URL: https://www. itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2020/09/2019-ITPZ-Conference-30y-1.pdf.
- 5. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.В. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 269 с.
- 6. *Ижовкина Н. И., Карпачев А. Т., Пулинец С. А.* Структурные особенности верхней дневной ионосферы по данным спутника «Интеркосмос-19» // Косм. исслед. 1996. Т. 34. № 2. С. 125–129.
- 7. *Карпачев А. Т., Телегин В. А., Жбанков Г. А.* Неоднородная структура ионосферы по данным спутника «Интеркосмос-19» // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 8-2. С. 317–320.
- 8. *Костин В. М., Мурашев В. Д.* Экспериментальные исследования возможностей спутникового радиомониторинга подземных ядерных испытаний // Рожденная атомным веком. М.: ССК, 2002. Т. 3. С. 178–191.
- Костин В. М., Беляев Г. Г., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я. Взаимосвязь развития тропических циклонов и отдельных сильных землетрясений в июне 1992 г. по данным мониторинга плазмы ионосферы со спутника «Космос-1809» // Материалы 18-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 нояб. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 401. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- 10. Костин В. М., Беляев Г. Г., Овчаренко О. Я., Трушкина Е. П. Мониторинг параметров плазмы верхней ионосферы для выявления мощных естественных и техногенных источников воздействия

на атмосферу из опыта работы спутника «Космос-1809»: стендовый докл. // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021, ИКИ РАН. 2021. С. 412. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.

- 11. *Мигулин В. В., Ларкина В. И., Молчанов О. А., Наливайко А. В.* Способ прогнозирования землетрясений: а. с. СССР № 3678754/24-25; опубл. 07.08.1985. Бюл. № 29.
- 12. *Aburjania G. D.* Self-localization of planetary wave structures in the ionosphere upon interaction with nonuniform geomagnetic field and zonal wind // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. No. 4. P. 533–546.
- Aburjania G. D., Kharshiladze O.A., Chargazia K.Z. Self-organization of IGW structures in an inhomogeneous ionosphere: 2. Nonlinear vortex structures // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. V. 53. No. 6. P. 750–760. DOI: 10.1134/S0016793213060029.
- 14. Fan W., McGuire J.J., de Groot-Hedlin C. D., Hedlin M.A. H., Coats S., Fiedler J. W. Stormquakes // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. No. 22. P. 12909–12918. DOI: 10.1029/2019GL0842217.
- Isaev N. V., Kostin V. M., Belyaev G. G., Ovcharenko O. Ya., Trushkina E. P. Disturbances of the topside Ionosphere caused by Typhoons // Geomagnetism and Aeronomy. 2010. V. 50. No. 2. P. 243–255. DOI: 10.1134/S001679321002012X.
- Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Kuleshova V. P. Statistical study of the F3-layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. V. 103. No. 10. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.01.010.
- 17. *Kosobokov V.G.* Hazard, risks, and prediction // Earthquakes and Sustainable Infrastucture. Elservier, 2021. Ch. 1. P. 1–25. DOI: 10.1016/C2020-0-00052-6.
- Kostin V. M., Belyaev G. G., Boychev B., Trushkina E. P., Ovcharenko O. Ya. Ionospheric precursors of the intensification of isolated tropical cyclones according to the IKB-1300 and Cosmos-1809 satellite data // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55. No. 2. P. 246–260. DOI: 10.1134/S0016793215020127.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Features of some interacting tropical cyclones in the Indian Ocean after the Mount Pinatubo eruption // Intern. J. Engineering Research and Science. 2019. V. 5. No. 9. P. 19–26. DOI: 10.5281/zenodo.3465257.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Impact of France Nuclear Tests on typhoons and Earthquakes in November 1990 // Intern. J. Engineering Research and Science. 2020. V. 6. No. 12. P. 25–31. DOI: 10.5281/zenodo.4400127.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Impact of typhoon Gay on lithospheric earthquakes // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: сб. тез. 2-й Всероссийской науч. конф. с международ. участием. Москва, 20–30 сент. 2021. М.: ИТПЗ РАН, 2021. Р. 114–115. URL: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2021/11/2021-ITPZ-Conference-Abstracts.pdf.
- 22. *Mautner D.A., Guard C.P.* Annual tropical cyclone report 1992 / Defense Technical Information Center. Guam, Mariana Island: Joint Typhoon Warning Center, 1992. 269 p.
- 23. *Plante R.J., Guard C.P.* Annual tropical cyclone report 1989 / Defense Technical Information Center. Guam, Mariana Island: Joint Typhoon Warning Center, 1989. 253 p.
- 24. *Pokhil A. E., Glebova E. S., Smirnov A. V.* Studying an interaction between tropical cyclones and jet streams using the numerical simulation data // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. V. 38. No. 3. P. 141–149. DOI: 10.3103/S1068373913030011.
- Pulinets S.A., Davidenko D. V., Ouzounov D. P., Karelin A. V. Physical bases of the generation of shortterm earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55. No. 4. P. 521–538. DOI: 10.1134/S0016793215040131.
- Steblov G. M., Sdel'nikova I. A. Regularities in the spatiotemporal variations of deformation processes in the region of Japan // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2019. V. 55. No. 4. P. 616–625. DOI: 10.1134/ S1069351319040104.

# Features of the relationship between tropical cyclones and earthquakes

### V. M. Kostin, G. G. Belyaev, O. Ya. Ovcharenko, E. P. Trushkina

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk 108840, Russia E-mails: kostin@izmiran.ru, belyaev@izmiran.ru, ovol99@mail.ru, elena@izmiran.ru

A close relationship has been shown between the occurrence of strong lithospheric earthquakes and the origin, development, and intensification of tropical cyclones (TCs) based on detailed measurements of ionospheric plasma parameters made by the Kosmos-1809 satellite, data from typhoon warning centers and data from ground-based seismic monitoring stations. Changes in the geography and depth of strong earthquakes during the passage of the TC of the New Caledonia Island were considered in detail using the Harry-89 TC as an example. Two trigger mechanisms for the impact of tropical cyclones on lithospheric earthquakes are proposed. It is shown that the acoustic impact of earthquakes and underground nuclear explosions in September 1992 on tropical disturbances caused the development of a chain of 11 TCs. Simplified physical models are considered to explain the mutual correlations between anomalous ionospheric parameters and powerful sources of influence on the atmosphere. Based on the results obtained, it is concluded that reliable and predictive monitoring of hazardous phenomena on Earth should combine space systems for remote sensing of the Earth, satellites that measure the parameters of the ionospheric plasma and solar wind, as ground-based systems that monitor implementation of the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty.

Keywords: tropical cyclones, earthquakes, satellait Cosmos-1809, upper ionosphere

Accepted: 28.01.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-125-139

### References

- 1. Avdyushin S. I., Vetchinkin N. V., Kozlov S. I., Petrov N. N., Romanovskii Yu. A., The Program "Active experiments and anthropogenic effects in the ionosphere": organization, instrumentation and methods, and main results, *Kosmicheskie issledovaniya*, 1993, Vol. 31, No. 1, pp. 3–25 (in Russian).
- Belyaev G. G., Kostin V. M., Detection a powerful natural and anthropogenic processes in the ionosphere, In: *Elektromagnitnye i plazmennye protsessy ot nedr Solntsa do nedr Zemli* (Electromagnetic and Plasma Processes from the Solar to the Earth's Interior), 2015, pp. 170–184 (in Russian).
- Belyaev G. G., Kostin V. M., Trushkina E. P., Ovcharenko O. Ya., Variations of plasma parameters of the upper Ionosphere after the underground nuclear tests, *Solnechno-zemnye svyazi i predvestniki zemletryasenii* (Solar-terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors), Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf., Petropavlovsk-Kamchatsky: IKIR FEB RAS, 2010, pp. 342–348 (in Russian).
- 4. Gorshkov A. I., Solov'ev A. A., Shebalin P. N., *K 30-letiyu ITPZ RAN* (To the 30<sup>th</sup> anniversary of ITPZ RAN), 2019, 60 p. (in Russian), available at: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2020/09/2019-ITPZ-Conference-30y-1.pdf.
- 5. Danilov A. D., Kazimirovskii E. S., Vergasova G. V., Khachikyan G. V., *Meteorologicheskie effekty v iono-sphere* (Meteorological effects in the ionosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 269 p. (in Russian).
- 6. Izhovkina N. I., Karpachev A. T., Pulinec S. A., Structural peculiarities of the daytime topside Ionosphere from the measurements onboard the satellite Interkosmos-19, *Cosmic Research*, 1996, Vol. 34, No. 2, pp. 114–118.
- 7. Karpachev A. T., Telegin V.A., Zhbankov G.A., Complex ionograms of sputnik "Interkosmos-19" associated with the ionospheric plasma irregularities, *Izvestiya vyshikh uchebnikh zavedenii. Fizika*, 2015, Vol. 58, No. 8-2, pp. 317–320 (in Russian).
- 8. Kostin V. M., Murashev V. D., Experimental studies of the possibilities of satellite radio monitoring of underground nuclear tests, In: *Rozhdennaya atomnym vekom* (Born by the atomic age), Moscow: SSK, 2002, Vol. 3, pp. 178–191 (in Russian).
- 9. Kostin V. M., Belyaev G. G., Trushkina E. P., Ovcharenko O. Ya., Correlation between the development of tropical cyclones and individual strong earthquakes in June 1992 according to the monitoring of the ionospheric plasma from the Cosmos-1809 satellite, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii*

*"Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 16–20 Nov. 2020, Moscow: IKI RAN, 2020, p. 401 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.

- Kostin V. M., Belyaev G. G., Ovcharenko O. Ya., Trushkina E. P., Monitoring of upper ionospheric plasma parameters to identify powerful natural and technogenic sources of impact on the atmosphere from the experience of the Cosmos-1809 satellite, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), IKI RAN, 2021, p. 412 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
- 11. Migulin V.V., Larkina V.I., Molchanov O.A., Nalivajko A.V., *Sposob prognozirovaniya zemletryasenii* (Earthquake prediction method), a.s. SSSR No. 3678754/24-25, 07.08.1985, Bul. No. 29 (in Russian).
- 12. Aburjania G.D., Self-localization of planetary wave structures in the ionosphere upon interaction with nonuniform geomagnetic field and zonal wind, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Vol. 47, No. 4, pp. 533–546.
- 13. Aburjania G. D., Kharshiladze O. A., Chargazia K. Z., Self-organization of IGW structures in an inhomogeneous ionosphere: 2. Nonlinear vortex structures, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 750–760, DOI: 10.1134/S0016793213060029.
- 14. Fan W., McGuire J.J., de Groot-Hedlin C.D., Hedlin M.A.H., Coats S., Fiedler J.W., Stormquakes, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, No. 22, pp. 12909–12918, DOI: 10.1029/2019GL0842217.
- Isaev N. V., Kostin V. M., Belyaev G. G., Ovcharenko O. Ya., Trushkina E. P., Disturbances of the topside Ionosphere caused by Typhoons, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2010, Vol. 50, No. 2, pp. 243–250, DOI: 10.1134/S001679321002012X.
- Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Kuleshova V. P., Statistical study of the F3-layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, Vol. 103, No. 10, pp. 121–128, DOI: 10.1016/j.jastp.2013.01.010.
- 17. Kosobokov V.G., Hazard, risks, and prediction, *Earthquakes and Sustainable Infrastucture*, Elservier, 2021, Ch. 1, pp. 1–25, DOI: 10.1016/C2020-0-00052-6.
- 18. Kostin V. M., Belyaev G. G., Boychev B., Trushkina E. P., Ovcharenko O. Ya., Ionospheric precursors of the intensification of isolated tropical cyclones according to the IKB-1300 and Cosmos-1809 satellite data, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, Vol. 55, No. 2, pp. 246–260, DOI: 10.1134/S0016793215020127.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E., Features of some interacting tropical cyclones in the Indian Ocean after the Mount Pinatubo eruption, *Intern. J. Engineering Research and Science*, 2019, Vol. 5, No. 9, pp. 19–26, DOI: 10.5281/zenodo.3465257.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E., Impact of France Nuclear Tests on typhoons and Earthquakes in November 1990, *Intern. J. Engineering Research and Science*, 2020, Vol. 6, No. 12, pp. 25– 31, DOI: 10.5281/zenodo.4400127.
- Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E., Impact of typhoon Gay on lithospheric earthquakes, 2<sup>nd</sup> All-Russia Scientific Conf. with Intern. Participation "Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquake Prediction", Book of absrt., Moscow, 29–30 Sept. 2021, Moscow: ITPZ RAN, 2021, pp. 114– 115, available at: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2021/11/2021-ITPZ-Conference-Abstracts. pdf.
- 22. Mautner D.A., Guard C.P., *Annual tropical cyclone report 1992*, Defense Technical Information Center, Guam, Mariana Island: Joint Typhoon Warning Center, 1992, 269 p.
- 23. Plante R.J., Guard C.P., *Annual tropical cyclone report 1989*, Defense Technical Information Center, Guam, Mariana Island: Joint Typhoon Warning Center, 1989, 253 p.
- Pokhil A. E., Glebova E. S., Smirnov A. V., Studying an interaction between tropical cyclones and jet streams using the numerical simulation data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, No. 3, pp. 141–149, DOI: 10.3103/S1068373913030011.
- Pulinets S.A., Davidenko D.V., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Physical bases of the generation of shortterm earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, Vol. 55, No. 4, pp. 521–538, DOI: 10.1134/S0016793215040131.
- Steblov G. M., Sdel'nikova I. A., Regularities in the spatiotemporal variations of deformation processes in the region of Japan, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 616–625, DOI: 10.1134/ S1069351319040104.