

ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.594

Т. В. Ершова

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ И ГРАВИТАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ ЗЕМЛИ

Приведены последние данные по пространственному распределению грозовой активности на земном шаре, полученные с помощью спутников и наземных систем обнаружения молний, а также всемирной метеорологической сети станций. Аномалии гравитационного поля рассматриваются в качестве дополнительной причины пространственного распределения грозовой активности по земному шару. Анализируются карты плотности разрядов молнии в землю и карты гравитационных аномалий, полученные с помощью спутников NASA. Показано, что обширные глобальные центры грозовой активности в центральной Африке и Южной Америке связаны с участками незначительных отрицательных гравитационных аномалий. Исключение составляет мировой грозовой очаг в районе Индонезии и Филиппин, который расположен над интенсивной положительной гравитационной аномалией. Региональный анализ в Центральной Европе показал наличие гроз-вых очагов над отрицательными гравитационными аномалиями.

Ключевые слова: гроза, плотность разрядов молнии в землю, гравитационное поле Земли, гравитационные аномалии.

Распределение гроз по земному шару весьма неравномерно. Пространственное глобальное распределение грозовой активности исследуется на основе данных визуально-слуховых наблюдений метеорологических станций, инструментальных измерений с помощью наземной системы местоопределения молний и спутниковых наблюдений за разрядами молний. Отдельные метеорологические станции на Земле имеют ряды наблюдений за числом дней с грозой до 100 лет. Необходимо отметить, что за день с грозой принимается как день с единственным разрядом молнии, так и день, в течение которого было несколько разрядов. В отдельных странах мира, в том числе и России, на метеорологических станциях определяют дополнительно продолжительность гроз в часах за год. Первые многопунктовые системы местоопределения молний были развернуты в США в конце 1970-х гг. и в настоящее время покрывают практически весь земной шар. В России наиболее широко используются однопунктовые грозопеленгаторы-дальномеры [1]. Только на территории европейского юга России в течение нескольких последних лет действует многопунктовая система местоопределения молний [2]. Спутниковые наблюдения за молниями производятся с середины 1960-х гг. Результаты инструментальных измерений как наземных, так и спутниковых представляются в виде карт изолиний количества разрядов на квадратный километр за год ($\text{разр}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$) или, другими словами, плотности разрядов молнии в землю. Спутниковые данные уточнили данные о количестве молниевых разрядов, происходящих за секунду на земном

шаре до 50, что в два раза меньше значения в 100 разрядов за секунду, приведенного М. Бруксом в 1925 г.

По современным данным Всемирной метеорологической организации [3], наибольшее среднегодовое число с грозами на земном шаре зарегистрировано в центральной части Бразилии в Южной Америке – 200 грозовых дней, при этом на территории Перу, Боливии и Парагвая значения среднего числа грозовых дней за год достигали 140. На территории Африки в Эфиопии регистрировались значения 190 дней с грозой, в Мали – 180 дней с грозой в год и на острове Мадагаскар – 140 грозовых дней. Рекордное значение числа дней с грозой за год было зарегистрировано на станции Богор в западной части острова Ява в Индонезии и составило 322 грозовых дня. По мере удаления от экватора эта величина снижается, и в Средиземноморье за год число дней с грозой изменяется от 7 в Португалии в районе г. Лиссабон до 64 в Албании г. Тирана. За полярным кругом гроза – это довольно редкое явление, которое можно наблюдать всего один раз за 10 лет.

В России наибольшее число грозовых дней регистрируется на территории Северного Кавказа и составляет около 60 грозовых дней за год [1]. На остальной территории России значения меняются от 10 до 30 дней с грозой.

Карты распределения плотности разрядов молнии в землю строят по данным наземной системы местоопределения молний. Например, одной из крупнейших мировых лидеров, занимающихся инструментальным обеспечением этих работ, является

компания VAISALA, которая создала сеть обнаружения молний уже в 45 странах мира [4]. По данным этой компании, максимальная плотность разрядов молнии на земном шаре отмечается в центральной части Африки и составляет 35 разр/(км² · год). На территории США, Аргентины и некоторых островах Океании прослеживаются очаги плотности разрядов молнии от 16 до 32 разр/(км² · год). Продвигаясь от экватора к полюсам, значения плотности разрядов значительно сокращаются. Например, на территории России максимальная плотность разрядов достигает в районе Северного Кавказа 5 разр/(км² · год), на остальной территории в среднем составляет 1–3 разр/(км² · год).

Карты распределения плотности разрядов молнии в землю, построенные по спутниковым данным NASA [5], позволяют выделить пять основных грозовых очагов на земном шаре. Самый крупный глобальный очаг по площади и интенсивности расположен в экваториальном районе Африки (плотность разрядов достигает 70 разр/(км² · год)). Второй расположен в Южной Америке в районе Парагвая и Бразилии, при этом плотность разрядов молний составляет 30–40 разр/(км² · год). Также можно выделить небольшой по площади, но интенсивный третий мировой грозовой очаг на побережье Венесуэлы. Он называется «молнии Кататумбо» или «маяк Маракайбо» [6]. В данном месте Южной Америки небо освещается молниями 160 дней в году до 10 часов в сутки. Названия даны в честь одноименной реки Кататумбо, которая впадает в озеро Маракайбо. Маяком это явление называли, потому что моряки использовали свечение во время многочисленных молний в качестве маяка. Четвертый мировой очаг плотности молний расположен над Индонезией. Пятый очаг находится над полуостровом Флорида в Северной Америке.

Одной из обсуждаемых проблем среди ученых, занимающихся атмосферным электричеством, является выявление причин пространственной неоднородности грозовой активности.

Грозы формируются при определенных синоптических условиях в кучево-дождевых облаках. Эти условия хорошо известны синоптикам. Грозы наблюдаются в слабо выраженных, заполняющихся циклонах, на перифериях малоподвижных антициклонов, в барических седловинах и в малоградиентном барическом поле, а также на атмосферных фронтах, особенно на холодных. Но даже при указанных необходимых синоптических условиях гроза не всегда реализуется. Отмечено [7–9], что даже на равнинных территориях с однотипными синоптическими условиями грозовая активность имеет пространственную неоднородность. Общеизвестно, что на земном шаре существуют очаги грозовой активности, которые стабильны во времени. В

качестве основных причин формирования мировых очагов можно назвать географическую широту – грозы тяготеют к низким широтам; наличие возвышенностей; аэрозольных частиц как основных ядер конденсации (из-за этих причин над сушей гроз больше, чем над океаном); определенное сочетание значений температуры и влажности поверхности и воздуха. В качестве дополнительных факторов, обуславливающих пространственную дифференциацию грозовой активности, можно рассматривать геофизические факторы. В географической оболочке Земли существует непрерывное взаимодействие. Процессы, происходящие в литосфере, отражаются и на состоянии нижних слоев атмосферы. Поэтому можно предположить, что аномалии гравитационного поля Земли, гравитационная дифференциация земного вещества, приводящая к тепловой конвекции в океане и атмосфере, магнитные аномалии, поток тепла из недр повлияют на термодинамические и кинетические характеристики атмосферы. Гипотеза о влиянии геофизических полей на очаговую структуру грозовой активности является широко обсуждаемой.

Е. П. Борисенков в [10] теоретически обосновал, что формирование конвективных движений как стимулятора грозовой активности будет происходить наиболее интенсивно в отрицательных очагах гравитационных аномалий. Конвективные движения проявляются в усилении вертикальных движений, изменении давления и вихреобразования. Автор также указал на важность учета влияния аномалий гравитационного поля при оценке динамики атмосферы, особенно в низких широтах, где и расположены наиболее крупные аномалии гравитационного поля Земли.

В предыдущей нашей работе под руководством В. П. Горбатенко [9] для территории Томской области и Казахстана приводился факторный и регрессионный анализ средних многолетних значений числа дней с грозой и продолжительности в часах с характеристиками атмосферы и почвы (температура, влажность, альbedo поверхности и др.) и литосферы (гравитационных и магнитных аномалий). Для территории южной Германии дополнительно анализировались поток тепла из недр земли и уровень фоновой радиоактивности.

Для равнинной территории Казахстана и Томской области наиболее существенной группой факторов, влияющих на пространственную неоднородность грозовой активности, определена группа, объединяющая высоту места над уровнем моря и значения температуры подстилающей поверхности; на втором месте – группа гравитационных аномалий и влажности почв, на третьем – величина магнитных аномалий. Для территории Германии пространственная неоднородность грозовой актив-

ности (число дней с грозой и плотность разрядов молнии в землю) объяснялась в большей мере аномалиями гравитационного поля и орографией.

Проведенный краткий обзор показывает, что гипотеза влияния геофизических полей на распределение грозовой активности требует дальнейшей проверки на фактическом материале. Распространение практически во всем мире с конца прошлого века систем местоопределения молний и спутниковых наблюдений позволяет получать достаточно точные многолетние карты плотности разрядов молний в землю. Наличие данной информации позволяет произвести сравнительный анализ карт плотности разрядов молний в землю и карт геофизических аномалий.

Цель данного исследования – провести сравнительный анализ пространственной дифференциации плотности разрядов молнии в землю и областей гравитационных аномалий.

Гравитационное поле Земли – это поле силы тяжести – равнодействующей силы тяготения и центробежной силы суточного вращения Земли [11]. Сила тяготения зависит от радиуса Земли: при наименьшем радиусе на полюсах сила тяготения наибольшая на полюсах. Центробежная сила зависит от радиуса орбиты, поэтому наибольшая на экваторе. Результирующая этих сил возрастает от экватора к полюсам соответственно от 978 до 983 галов. Наиболее привычная характеристика – это ускорение свободного падения, которое в среднем над земной поверхностью равно $9,8 \text{ м/с}^2$, или 981 Гал. Напряженность реального поля в каждой конкретной точке отличается от среднего, и возникают аномалии гравитационного поля в несколько миллигал. При этом аномалии могут быть положительными и отрицательными. На первый взгляд, горные хребты создают дополнительную массу и должны бы вызывать положительные аномалии, а океанические впадины, наоборот, отрицательные. Но в реальных условиях это не совсем так. Только над молодыми горами наблюдаются слабые положительные аномалии. В океанах же происходит отложение наносов, что увеличивает массу. Современные космические приборы позволяют фиксировать гравитационные аномалии.

В качестве материалов исследований выступали карты гравитационных аномалий земной поверхности [12], построенные по данным измерений двух спутников GRACE (Gravity Recovery And Climate Change) агентства NASA. Два спутника одновременно вращались вокруг Земли по полярной орбите на высоте около 500 км, при этом расстояние между спутниками было 220 км. Находясь над областью Земли с избыточной массой, спутник приобретал ускорение и в дальнейшем, пролетев над этой областью, замедлялся. С помощью радара

измерялось расстояние между двумя спутниками, что и служило основой для определения значений аномалий гравитационного поля.

Пространственное распределение грозовой активности оценивалось по картам плотности разрядов молнии в Землю по спутниковым данным OTD (Optical Transient Detector) и LIS (Lightning Imaging Sensor) агентства NASA [13]. Оба аппарата были выведены на орбиту в конце прошлого века и оборудованы детекторами кратковременных вспышек инфракрасного излучения, которые возникают при разряде молнии. Молнии со спутника регистрировались не только ночью, но и днем, включая разряды облако – земля.

Сопоставление карты распределения плотности разрядов молнии по земному шару с картой аномалий гравитационного поля показывает, что самые интенсивные грозовые очаги расположены над территориями с незначительными отрицательными гравитационными аномалиями: центрально-африканский грозовой очаг и «молнии Кататумбо» в Южной Америке расположены над гравитационной аномалией до -10 мГал . Интенсивный очаг над Флоридой на юге Северной Америки также расположен над гравитационной аномалией от -10 до 0 мГал . Для района Парагвая и Бразилии в Южной Америке протяженный грозовой очаг приходится на территорию с аномалией от -10 до 0 мГал . Исключение составляют грозовые очаги в районе Индонезии и Филиппин, где значения положительных гравитационных аномалий достигают мировых максимумов (до $40-50 \text{ мГал}$).

Дополнительно было проведено исследование для территории южной Германии. Карты плотности разрядов молнии в землю были предоставлены компанией «Сименс» [14]. Отметим, что на мировых картах гравитационных аномалий вся территория Германии попадает в район положительных значений гравитационных аномалий. Региональные карты Германии, построенные по данным гравиметрических наземных измерений, дают более пеструю картину. Значения аномалий на исследуемой территории изменялись в пределах от $+26 \text{ мГал}$ в районе впадения реки Майн в Рейн (юго-запад Германии) до -125 мГал в Альпах (южная оконечность Германии).

Был рассчитан коэффициент корреляции для 90 пар значений плотности разрядов молнии в землю и значений аномалий гравитационного поля. В результате коэффициент корреляции составил $0,6$ и значим с вероятностью 95% . При этом все значения наибольшей плотности разрядов молнии в землю в интервале от 3 до 5 соответствовали значениям гравитационных аномалий от -50 до $+10 \text{ мГал}$.

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

– наиболее интенсивные и обширные глобальные очаги молниевых разрядов (южно-африканский и южно-американский) расположены над незначительными отрицательными гравитационными аномалиями от -10 до 0 мГал. Исключение составляет грозовой очаг в районе Индонезии и Фи-

липпин над интенсивной положительной гравитационной аномалией;

– региональные очаги грозовой активности (от 3 до 5 разр/($\text{км}^2 \cdot \text{год}$)) в Центральной Европе соответствуют в основном участкам отрицательных гравитационных аномалий от -50 до 0 мГал.

Список литературы

1. Горбатенко В. П., Ершова Т. В. Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск: Изд-во Томского гос. пед. университета, 2011. 204 с.
2. Аджиев А. Х., Князева З. М., Юрченко Н. В. Создание для Северного Кавказа карты поражаемости территории разрядами молнии и карты районирования по опасности возникновения чрезвычайных ситуаций при грозах // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 38–44.
3. Vouqueneau C. Doit-on craindre la foudre? EDP sciences, 2006. P. 184.
4. Vaisala. URL: <http://www.vaisala.com> (дата обращения 10.03.2015).
5. Christian H. J., Blakeslee R. J., Boccippio D. J., Boeck W. L., Buechler D. E., Driscoll K. T., Goodman S. J., Hall J. M., Koshak W. J., Mach D. M., Stewart M. F. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108 (D1). 4005. doi:10.1029/2002JD00234.
6. Márquez H. Venezuela: Lightning in the Sky Fed by Underground Methane. URL: <http://www.ipsnews.net/> (дата обращения 10.03.2015).
7. Ершова Т. В., Горбатенко В. П. Исследования атмосферного электричества в Томске // Вестн. Томского гос. пед. ун-та (TSPU Bulletin). 2010. Вып. 9 (99). С. 178–182.
8. Горбатенко В. П., Дульзон А. А., Решетько М. В. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью // Метеорология и гидрология. 1999. № 12. С. 21–28.
9. Горбатенко В. П., Дульзон А. А., Гиндуллин Ф. А., Ершова Т. В., Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Логинов С. В. Анализ структуры грозовых рядов и факторов, влияющих на пространственную неоднородность грозовой активности // Проектирование и технология электронных средств. Спец. вып., 2004. С. 61–65.
10. Борисенков Е. П. Роль аномалий гравитационного поля Земли в формировании конвективных движений как стимулятора грозовой активности // Труды Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир. 21–26 сентября 2003. Владимир: Транзит ИКС, 2003. Т. II. С. 42–44.
11. Селиверстов Ю. П., Бобков А. А. Землеведение: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2007. 302 с.
12. Murray T. Greenland's ice on the scales // Nature. 2006. V. 443. P. 277–278.
13. NASA. Global Hydrology Resource Center. Lightning and atmospheric electricity research. URL: <http://thunder.nsstc.nasa.gov/lis/> (дата обращения 10.03.2015).
14. Gorbatenko V., Ershova T., Ribina N., Thern S. Statistical characteristics of the lightning in Germany // Proceedings of the 29th International Conference on Lightning Protection, ICLP-2008, Uppsala, Sweden. 23th–26th of June 2008. P. 291–297.

Ершова Т. В., кандидат физико-математических наук, доцент.
Томский государственный педагогический университет.
Ул. Киевская, 60, Томск, Россия, 634061.
E-mail: Ershova10@mail.ru

Материал поступил в редакцию 18.03.2015.

T. V. Ershova

SPATIAL INHOMOGENEITY OF THUNDERSTORM ACTIVITY AND EARTH'S GRAVITY FIELD ANOMALIES

The article presents the analysis of recent data on the global distribution of thunderstorm activity obtained from satellites and ground-based lightning detection systems, as well as the World's Meteorological stations network. Gravity anomalies are considered as additional reasons for the spatial distribution of thunderstorm activity over the Globe. Analyzes maps of lightning discharges density, and maps of Earth's gravity field anomalies obtained by NASA satellites. It is shown that the vast global centers of thunderstorm activity in central Africa and South America are associated with areas of slight negative gravity anomalies. An exception is the world thunderstorm outbreak in the region of Indonesia and the Philippines, which is located above the intense positive gravity anomaly. Regional analysis in Central Europe showed the presence of thunderstorm cells over the negative gravity anomalies.

Key words: *thunderstorm, lightning discharges density, gravity field of the Earth, Earth's gravity field anomalies.*

References

1. Gorbatenko V. P., Ershova T. V. *Molniya kak zveno global'noy elektricheskoy tsepi* [Lightning as a link in the global electric circuit]. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta Publ., 2011. 204 p (in Russian).
2. Adzhiev A. Kh., Knyazeva Z. M., Yurchenko N. V. Sozdaniye dlya Severnogo Kavkaza karty porazhaemosti territorii razryadami molnii i karty rayonirovaniya po opasnosti vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy pri grozakh [Creating maps for the North Caucasus territory affection lightning strikes and zoning maps for the risk of emergencies during thunderstorms]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN – News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center, RAS*, 2013, no. 3, pp. 38–44 (in Russian).
3. Bouquegneau C. *Doit-on craindre la foudre?* EDP sciences, 2006. 184 p.
4. *Vaisala*. URL: <http://www.vaisala.com> (accessed 10 March 2015).
5. Christian H. J., Blakeslee R. J., Boccippio D. J., Boeck W. L., Buechler D. E., Driscoll K. T., Goodman S. J., Hall J. M., Koshak W. J., Mach D. M., Stewart M. F. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108 (D1). 4005. doi: 10.1029/2002JD00234.
6. Márquez H. *Venezuela: Lightning in the Sky Fed by Underground Methane*. URL: <http://www.ipsnews.net/> (accessed 10 March 2015).
7. Ershova T. V., Gorbatenko V. P. Issledovaniya atmosfernogo elektrichestva v Tomske [The investigation of atmospheric electricity of Tomsk]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta – TSPU Bulletin*, 2010, no. 9 (99), pp. 178–182 (in Russian).
8. Gorbatenko V. P., Dul'zon A. A., Reshet'ko M. V. Prostranstvennyye i vremennyye variatsii grozovoy aktivnosti nad Tomskoy oblast'yu [Spatial and temporal variation of thunderstorm activity over the Tomsk region]. *Meteorologiya i gidrologiya – Russian Meteorology and Hydrology*, 1999, no. 12, pp. 21–28 (in Russian).
9. Gorbatenko V. P., Dul'zon A. A., Gindullin F. A., Ershova T. V., Ippolitov I. I., Kabanov M. V., Loginov S. V. Analiz struktury grozovykh ryadov i faktorov, vliyayushchikh na prostranstvennyuyu neodnorodnost' grozovoy aktivnosti [Analysis of the structure of thunderstorm series and the factors affecting the spatial inhomogeneity of thunderstorm activity]. *Proektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv. Spetsial'nyy vypusk – Design and technology of electronic means. Special edition*, 2004, pp. 61–65 (in Russian).
10. Borisenkov E. P. Rol' anomalii gravitatsionnogo polya Zemli v formirovaniye konvektivnykh dvizheniy kak stimulyatora grozovoy aktivnosti [The role of the anomalies of the gravitational field of the Earth in the formation of convective motions as a stimulator of thunderstorm activity]. *Trudy V Rossiyskoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Proceedings of the V Russian Conference on Atmospheric Electricity]. Vladimir, Tranzit IKS Publ., 2003. Vol. II. Pp. 42–44 (in Russian).
11. Seliverstov Yu. P., Bobkov A. A. *Zemlevedeniye: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Geography: textbook]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 302 p. (in Russian).
12. Murray T. Greenland's ice on the scales. *Nature*, 2006, vol. 443, pp.277–278.
13. NASA. *Global Hydrology Resource Center. Lightning and atmospheric electricity research*. URL: <http://thunder.nsstc.nasa.gov/lis/> (accessed 10 March 2015).
14. Gorbatenko V., Ershova T., Ribina N., Thern S. Statistical characteristics of the lightning in Germany. *Proceedings of the 29th International Conference on Lightning Protection, ICLP-2008, Uppsala, Sweden*. 2008. Pp. 291–297.

Ershova T. V.

Tomsk State Pedagogical University.

Ul. Kiyevskaya, 60, Tomsk, Russian, 634061.

E-mail: Ershova10@mail.ru