

Зависимость температурной чувствительности частоты молний и природных пожаров от типа внешнего воздействия на земную систему по расчётам с моделью ИФА РАН

Р.П. Михайлов^{1,3)}, А.В. Елисеев^{1,2,3,4)}, В.В. Гурьянов¹⁾*

¹⁾ Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420097, Казань, ул. Товарищеская, 5

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, с. 2

³⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

⁴⁾ Институт глобального климата и экологии,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

* Адрес для переписки: *mikhailov.r2001@gmail.com*

Реферат. С помощью модели Земной системы ИФА РАН проведены численные эксперименты для 1850-2014 гг. с различными типами внешнего воздействия. Все воздействия были заданы в соответствии с условиями численного эксперимента "historical" проекта Coupled Models Intercomparison project, phase 6 (CMIP6). В период 1997-2013 гг. Модель в сравнении со спутниковыми данными Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector – LIS/OTD реалистично воспроизводит частоту молний (ЧМ) – как глобальные значения, так и пространственное распределение. При этом модель воспроизводит глобальный коэффициент чувствительности частоты молний к изменению приземной температуры только в ряде регионов при учете воздействия на климат за счёт изменения содержания антропогенных (сульфатных) аэрозолей в тропосфере. МЗС ИФА РАН воспроизводит годовую площадь выгорания из-за природных пожаров (ПП) с ошибками в отдельных регионах. Лучше всего модель воспроизводит чувствительность площади выгорания из-за ПП к изменению частоты молний в экспериментах с учетом антропогенного воздействия.

Ключевые слова. Частота молний, природные пожары, МЗС ИФА РАН, внешние воздействия на Земную систему, изменения климата.

Dependence of temperature sensitivity of lightning and wildfire frequency on the type of external forcing on the Earth system as based on IAP RAS model simulations

R.P. Mikhailov^{1,3)}, A.V. Eliseev^{1,2,3,4)}, V.V. Guryanov¹⁾*

¹⁾ Kazan Federal University,
5, Tovarishcheskaya, 420097, Kazan, Russian Federation

²⁾ Lomonosov Moscow State University,
1, bld. 2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation

³⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevsky, 119017, Moscow, Russian Federation

⁴⁾ Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *mikhailov.r2001@gmail.com*

Abstract. We conducted numerical experiments for the 1850-2014 period using the IAP RAS Earth System model of intermediate complexity (IAP RAS EMIC) under various types of external forcing. We prescribed all forcings according to the protocol of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) "historical" experiment. For 1997-2013, the model realistically reproduces the lightning flash frequency (LFF) – both global values and spatial distribution – as compared to the Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector (LIS/OTD) satellite data. However, the model captures the global sensitivity coefficient of the LFR to surface air temperature changes only in specific regions and only in the simulations driven by tropospheric anthropogenic (sulfate) aerosol concentrations. The IAP RAS EMIC simulates the annual wildfire (WF) burned area with errors in some regions. The model is most skillful in reproducing the sensitivity of the WF burned area to LFF changes in experiments under anthropogenic forcing.

Keywords. Lightning flash frequency, wildfires, IAP RAS EMIC, external forcing on the Earth system, climate change.

Введение

Грозовое электричество возникает в результате конвективной активности в атмосфере, ведущей к образованию мощных кучево-дождевых облаков (Тверской, 1964; Williams, 2005; Rakov, Uman, 2007; Мареев, 2010; Price, 2013). Как следствие, характеристики молниевой активности тесно связаны с характеристиками погодно-климатических процессов (Тверской, 1964; Williams, 2005). Кроме того, молнии являются одним из основных естественных источников оксидов азота в тропосфере (Price, 2013; Banerjee et al., 2014), которые, в свою очередь, играют важную роль в химических процессах атмосферы (Warneck, 2000; Суркова, 2002; Seinfeld, Pandis, 2012; Смышляев и др., 2010). Наконец, молнии являются одним из наиболее распространенных источников природных пожаров (ПП), прежде всего, в регионах с малой плотностью населения (Stocks et al., 2002; Ganteaume et al., 2013; Price, 2013; Елисеев, Васильева, 2020).

В свою очередь, ПП играют важную роль как в динамике экосистем, так и в глобальных биогеохимических циклах (Hantson et al., 2016; Lasslop et al., 2019). Возникновение и развитие природных пожаров, в свою очередь, опре-

деляется рядом факторов, в том числе связанных с характеристиками климата, растительности, почвогрунта и населения. Всё это обуславливает необходимость как эмпирических, так и модельных исследований ПП. В модельных исследованиях особую роль приобретает адекватный учёт связи характеристик природных пожаров с изменяющимися во времени факторами, среди которых отдельные климатические характеристики, такие как молниевая активность и плотность населения.

В связи с этим в последние десятилетия в модели Земной системы активно внедряются схемы расчёта характеристик молниевой активности, прежде всего – частоты молний (ЧМ) (Price, Rind, 1992; Tost et al., 2007; Mareev, Volodin, 2014; Krause et al., 2014; Clark et al., 2017; Елисеев и др., 2019). Вычисленная при этом частота молний служит одним из входных параметров схем природных пожаров (Arora, Boer, 2005; Pechony, Shindell, 2009; Thonicke et al., 2010; Елисеев и др., 2017; Mangeon et al., 2016; Елисеев, Васильева, 2020).

Одним из основных результатов модельного анализа изменения частоты молний при климатических изменениях является общий рост частоты молний (и, соответственно, частоты одного из источников возгорания для ПП) при потеплении климата на вековых масштабах или при равновесном изменении климата (положительная корреляция между приземной температурой и ЧМ) (Price, Rind, 1994; Mareev, Volodin, 2014; Елисеев и др., 2019; Михайлов и др., 2024; Guryanov et al., 2024). С другой стороны, на десятилетнем и междесятилетнем временных масштабах в отдельных регионах потепление климата в моделях может сопровождаться уменьшением ЧМ (а похолодание – увеличением) (Guryanov et al., 2024). Подобное также отмечается по спутниковым данным для частоты молний (Guryanov et al., 2024), а также по данным мировой грозопеленгационной сети в отдельных регионах (Burrows et al., 2025). Наконец, отмечается также региональная зависимость знака коэффициента тренда характеристик конвективной активности в атмосфере (тесно связанных с молниевой активностью, см. ниже) по данным станций метеорологической сети (Чернокульский и др., 2022).

Указанные региональные особенности связи частоты молний с приземной температурой атмосферы могут быть связаны как с естественной изменчивостью климата, так и с особенностями отклика характеристик молниевой активности на внешние воздействия на Земную систему различной природы. В частности, в (Guryanov et al., 2024) было отмечено, что ряд регионов с отрицательной корреляцией между приземной температурой и ЧМ характеризуется также наиболее сильным влиянием рассеивающих аэрозолей в атмосфере, выхолаживающих поверхность и подавляющих испарение (и, следовательно, источник энергии для развития глубокой конвекции).

Как следствие, целесообразным является анализ связи частоты молний и характеристик природных пожаров с выделением различных типов внешнего воздействия на Земную систему и естественной изменчивости климата.

Данная работа посвящена одной из составляющих этой задачи – анализу зависимости температурной чувствительности молний и частоты возгораний

природных пожаров от типа внешнего воздействия на земную систему с помощью МЗС ИФА РАН (модель Земной системы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук) в современный период.

Материалы и методы

Модель Земной климатической системы, МЗС ИФА РАН

МЗС ИФА РАН состоит из блоков динамики атмосферы, океана, морского льда, деятельного слоя суши, биогеохимических циклов суши и океана и блока описания электрических процессов в атмосфере (молниевой активности) (Елисеев и др., 2025).

Атмосферный блок МЗС ИФА РАН включает в себя блоки переноса коротковолновой и длинноволновой радиации, конвекции, образования облаков и осадков. Крупномасштабная динамика атмосферы (с пространственным и временным масштабами больше синоптических) описывается явно. Синоптические процессы параметризуются с использованием диффузионного приближения (Петухов, 1980). Это позволяет существенно уменьшить время, необходимое для модельных расчётов. Гидрологический цикл атмосферы вычисляется в приближении постоянной по времени (но зависящей от географических и вертикальной координат) относительной влажности атмосферы. Кроме того, особенностью модели является представление профилей температуры, удельной влажности и концентрации сульфатных аэрозолей в атмосфере в виде универсальных функций.

Океанический блок МЗС ИФА РАН – статистически-динамическая модель с параметризацией синоптического обмена в диффузионном приближении. Кроме того, в океаническом блоке модели в настоящее время используется приближение постоянной по времени (но зависящей от географических и вертикальной координат) солёности. Характеристики морского льда в МЗС ИФА РАН рассчитываются в зависимости от приповерхностной температуры и температуры поверхности океана (Петухов, 1980).

Блоком деятельного слоя суши является детальная модель термо- и гидрофизики почвогрунта (Аржанов и др., 2008) с глубиной расположения нижней границы расчётного домена более 63 м и высоким (5 см) вертикальным разрешением в верхнем 10-метровом слое. Особенностью модели является учёт торфа и мхов на термофизические параметры почвогрунта.

Блок наземного углеродного цикла – среднегодовая модель, учитывающая, наряду с фотосинтезом наземной растительности и автотрофным и гетеротрофным дыханием, природные пожары (Елисеев и др., 2014; Eliseev et al., 2014; Елисеев и др., 2017). Модуль природных пожаров основан на модели GlobFIRM (Thonicke et al., 2001) с модификацией за счет учета источников возгорания – как антропогенных, так и молниевых (Елисеев и др., 2017). В схеме природных пожаров МЗС ИФА РАН также учитывается ликвидация пожаров и влияние фрагментации ландшафтов на развитие ПП. Кроме того, блок наземного углеродного цикла учитывает влияние доли диффузной солнечной радиации в полном потоке фотосинтетически-активной радиации и

содержания диоксида серы в воздухе на интенсивность фотосинтеза растительности, подсеточную неоднородность типов растительности в модельной ячейке и интенсификацию гетеротрофного дыхания за счёт культивации. Соответствующий блок океана основан на модели Бакастоу с учётом зависимости констант скорости химических реакций неорганического углеродного цикла океана от температуры (Muryshv et al., 2017). Блок замыкается уравнением баланса массы CO_2 в атмосфере в приближении хорошо перемешанного газа.

Блок электрических процессов в атмосфере в настоящее время описывает частоту молний (в том числе как источников возгорания для природных пожаров). Вычислительная схема основана на схеме Прайса-Ринда (Price, Rind, 1992), но учитывает не отдельные грозовые облака, а статистические ансамбли таких облаков (Елисеев и др., 2019), так что частота молний:

$$f = C h^{\alpha} n_{co}, \quad (1)$$

где C – постоянная, зависящая от типа поверхности (суша или океан), h – высота верхней границы конвективных облаков, n_{co} – доля покрытия модельной ячейки конвективной облачностью. В (Елисеев и др., 2019) рекомендованы значения $\alpha = 2.6$ над сушей и $\alpha = 1.3$ над океаном. Характеристики конвективных облаков вычисляются согласно (Eliseev et al., 2013).

Горизонтальное разрешение МЗС ИФА РАН составляет 4.5° широты и 6° долготы с 8 уровнями по вертикали в атмосфере, 3 уровнями в океане, 300 уровнями в почвогрунте, до 40 уровней в снежном покрове. В наземном биогеохимическом модуле учитываются 7 функциональных типов растительности (один из которых зарезервирован под сельскохозяйственные растения). Модель интегрируется с шагом по времени, равным 5 сут.

Численные эксперименты

С МЗС ИФА РАН были проведены численные эксперименты для 1850–2014 гг.:

- GHG: учёт влияния на климат изменения атмосферных концентраций основных хорошо перемешанных газов (CO_2 , CH_4 , N_2O);
- SO_4 : соответствующее влияние изменения содержания антропогенных сульфатных аэрозолей в тропосфере;
- ALU: соответствующее влияние изменения альбедо подстилающей поверхности из-за землепользования;
- VOL: соответствующее влияние изменения содержания стратосферных аэрозолей от плинианских вулканических извержений;
- SOL: соответствующее влияние изменения солнечной постоянной;
- ALL: учёт влияния всех указанных выше воздействий.

Все указанные воздействия были заданы в соответствии с условиями численного эксперимента "historical" проекта CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6; Eyring et al., 2016). В качестве начальных условий интегрирования использовалось равновесное доиндустриальное

состояние модели. В дальнейшем анализ ограничивается 1996-2013 гг. для непосредственного сравнения с результатами (Guryanov et al., 2024) расчётов по МЗС, основанных на моделях общей циркуляции.

Результаты

Воспроизведение частоты молний и их зависимость от температуры

В 1995-2013 гг. среднегодовая ЧМ f по спутниковым данным LIS/OTD (Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector; Peterson et al., 2021) максимальна над тропиками Африки (рис. 1а). С увеличением географической широты частота молний уменьшается. Максимумы частоты молний также выделяются в отдельных регионах Южной Америки, Северной Америки, Евразии и над архипелагом Юго-Восточной Азии.

В расчетах с моделью МЗС ИФА РАН воспроизводится максимум над экваториальными районами Африки и над бассейном Амазонки во всех численных экспериментах (рис. 1 б-ж). Следует отметить, что если по данным LIS/OTD первый максимум превышает второй, то в модели максимум f над бассейном Амазонки несколько больше максимума над центральной Африкой. Эта ошибка, причём в ещё большей степени, характерна и для других МЗС (Guryanov et al., 2024). Также МЗС ИФА РАН хорошо воспроизводит частоту молний в регионах вторичных максимумов f , но значительно завышает частоту молний в остальных районах, в том числе над Амазонской низменностью. Кроме того, f завышено почти над всеми регионами суши в тропиках и в средних широтах Северного полушария. Наконец, МЗС ИФА РАН во всех численных экспериментах занижает частоту молний над высокими широтами суши и над океанами.

Тем не менее, МЗС ИФА РАН в целом воспроизводит глобальное значение ЧМ при всех типах воздействия (табл. 1). Наилучшее согласие с данными LIS/OTD при этом характерно для экспериментов ALL и GHG с наибольшим потеплением климата в XX веке.

Нами оценен коэффициент чувствительности частоты молний к изменению температуры b , вычисленный с использованием линейной регрессии для этих переменных. При использовании среднеглобальных данных LIS/OTD для ЧМ и данных ERA5 (ECMWF Reanalysis v5; Hersbach et al., 2020) для приземной температуры он равен $-11 \pm 7\%/K$ (здесь и далее указаны средняя оценка и среднеквадратическое отклонение; табл. 1). Следует, однако, отметить, что b статистически значим в относительно небольшом числе регионов – в средних широтах Европы и Северной Америки, в центральной Азии, над океаном вблизи юго-восточного побережья Азии и в ряде регионов тропиков. При этом знак средней (центральной) оценки b меняется между этими регионами, в том числе между западной и восточной частями средних широт Северной Америки (рис. 2).

Однако в экспериментах с моделью как абсолютная величина этого коэффициента, так и его знак меняются в зависимости от типа воздействия. При этом если для данных LIS/OTD/ERA5 этот коэффициент отрицателен

(хотя его уровень статистической значимости не достигает 95%), то для большинства модельных экспериментов он положителен (и статистически значим на указанном уровне для экспериментов ALL, GHG и VOL). Исключением является численный эксперимент с заданием только площади распространения сельскохозяйственных угодий, для которого центральная оценка b отрицательна, но статистически незначима. Модель во всех экспериментах воспроизводит изменение f при изменении приземной температуры в регионах, для которых средняя оценка b положительна и статистически значима (центральная Азия, восток средних широт Северной Америки и океан вблизи юго-восточного побережья Азии). В эксперименте SO₄ частично воспроизводятся и регионы с отрицательным b (тропики Южной Америки и Африки, в меньшей степени – средние широты Европы), что может указывать на вклад этого антропогенного воздействия на характеристики молниевой активности в указанных регионах.

Следует отметить, что современная версия МЗС ИФА РАН не воспроизводит естественную изменчивость климата (Елисеев и др., 2025). Как следствие (хотя это и не может служить надежным доказательством), в других регионах, где по данным LIS/OTD/ERA5 коэффициент b отрицателен, отрицательная корреляция ЧМ и приземной температуры может быть связана с естественной изменчивостью климата.

Таблица 1. Глобальные характеристики частоты молний (1996-2013 гг. для данных LIS/OTD и 1996-2013 гг. для МЗС ИФА РАН). В последнем столбце указаны средняя оценка и среднеквадратическое отклонение

Table 1. Global lightning flash rate characteristics (1996-2013 for LIS/OTD data and 1996-2013 for the IAP RAS EMIC). The last column shows the mean estimate and standard deviation

Данные модель/форсинг	Средняя многолетняя ЧМ, с ⁻¹	Коэффициент чувствительности ЧМ к изменению приземной температуры b (%/К)
LIS/OTD / ERA5	44.8	-10.7±6.5
ALL	43.4	8.3±0.7
GHG	45.9	7.5±0.8
SO ₄	43.7	0.9±2.6
ALU	42.7	-2.3±3.4
SOL	40.8	7.6±5.5
VOL	42.9	9.4±3.4

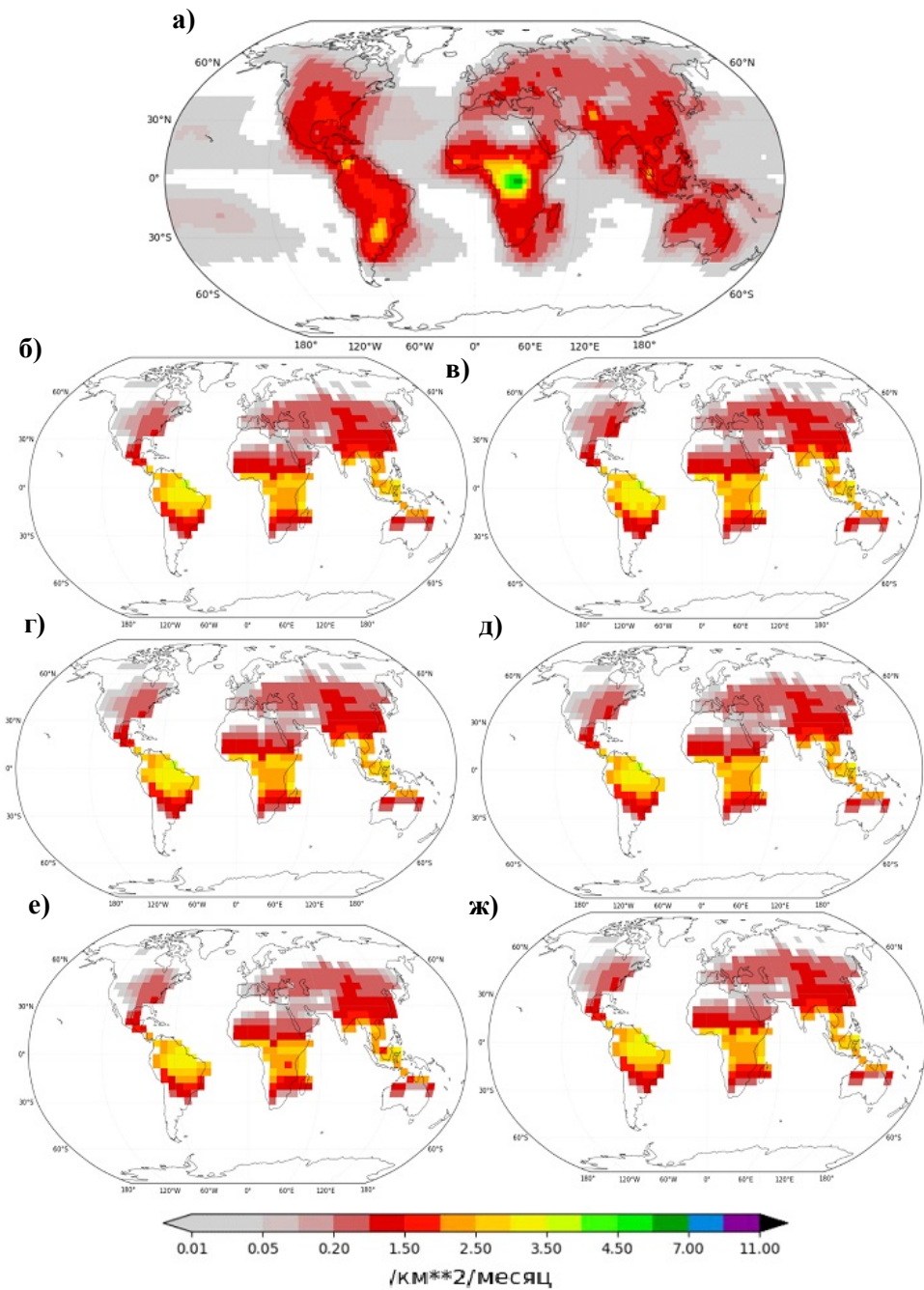


Рисунок 1. Частота молний ($\text{км}^{-2} \text{ мес}^{-1}$) по данным LIS/OTD (а) и по расчетам с МЗС ИФА РАН в экспериментах с форсингами ALL (б), GHG (в), SO_4 (г), ALU (д), SOL (е), VOL (ж) в среднем за год для 1996-2013 гг.

Figure 1. Lightning flash rate ($\text{km}^{-2} \text{ month}^{-1}$). Panels show the LIS/OTD annual mean data for 1996-2013 (a) and IAP RAS EMIC annual mean simulations for 1996-2013 in the ALL (b), GHG (c), SO_4 (d), ALU (e), SOL (f), and VOL (g) forcing experiments

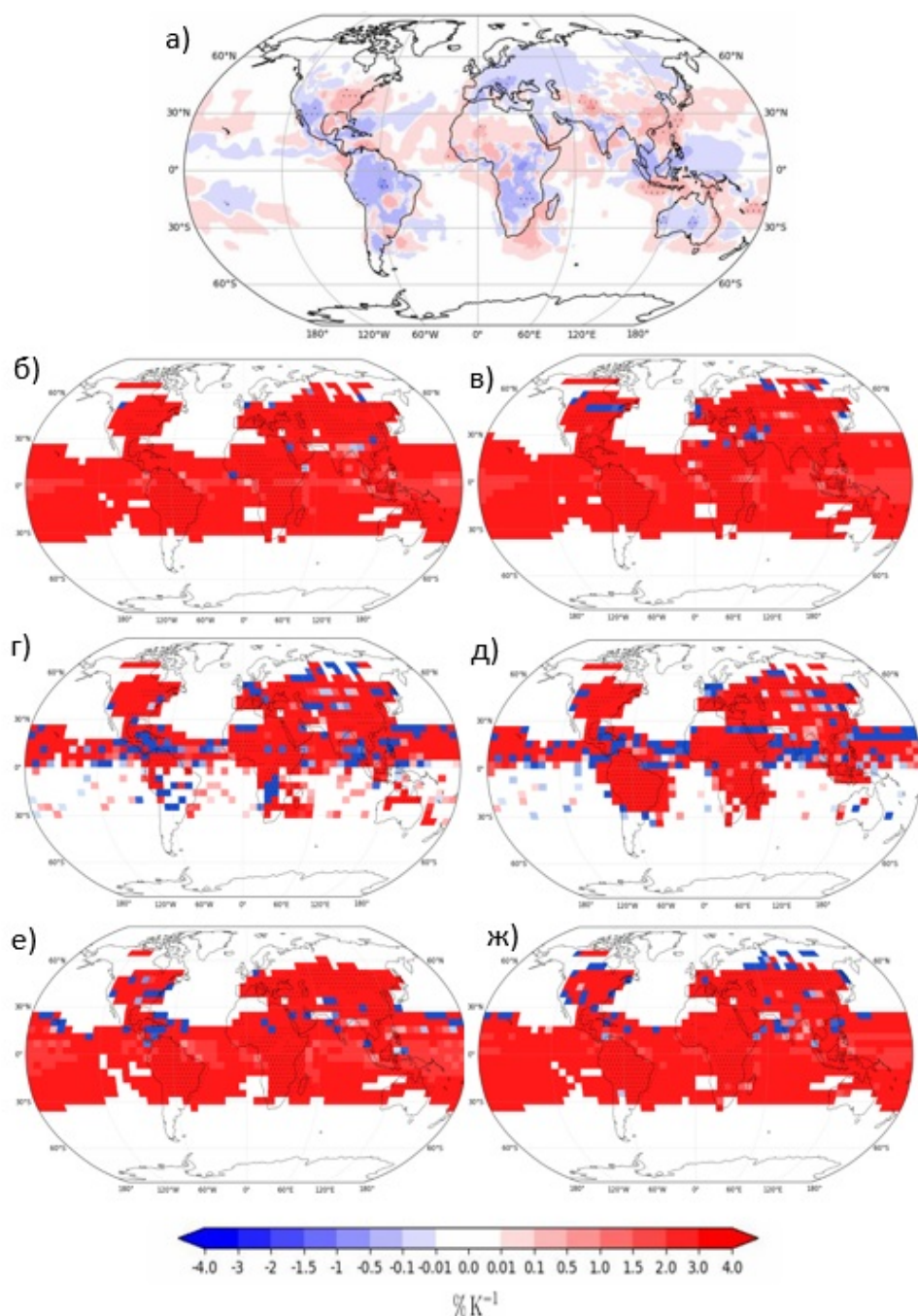


Рисунок 2. Коэффициент чувствительности частоты молний от температуры (%/K) LIS/OTD и ERA5 (а) по расчетам с МЗС ИФА РАН в экспериментах ALL (б), GHG (в), SO₄ (г), ALU (д), SOL (е), VOL (ж) в среднем за год для 1996-2013 гг.

Figure 2. Sensitivity coefficient of the lightning flash rate to temperature (%/K). Panels show the annual mean LIS/OTD and ERA5 data for 1996-2013 (a) and IAP RAS EMIC annual mean simulations for 1996-2013 in the ALL (b), GHG (c), SO₄ (d), ALU (e), SOL (f), and VOL (g) experiments

Воспроизведение характеристик природных пожаров и их зависимость от частоты молний

Молниевые удары способны быть источниками природных пожаров. По данным GFED4.1 (Global Fire Emission Database, 4.1; (Randerson et al., 2012; van der Werf et al., 2017)), площадь выгорания за счёт природных пожаров (ПП; здесь и далее в вычислениях исключены сельскохозяйственные пожары) максимальна в центральной Африке, а также на севере Австралии. Другими регионами с большой площадью выгорания являются средние и субполярные широты Евразии и Северной Америки, полуостров Индокитай и центр Южной Америки (рис. 3а, б). Глобальная годовая площадь выгорания A_f за счёт ПП при осреднении за 1997-2013 гг. по указанным данным составляет 4.3 млн км² (табл. 2, рис. 3). Стоит отметить, что по обновлённому массиву GFED5.1 (Chen et al., 2023a, 2023b) соответствующее значение намного больше – около 8 млн км² за счёт учёта пожаров с горизонтальными размерами в несколько сот метров (подробнее см. (Chen et al., 2023)). Однако грубое пространственное разрешение МЗС ИФА РАН и особенности включённой в неё статистической схемы воспроизведения ПП затрудняют воспроизведение малых пожаров, в связи с чем более оправданным представляется СП сравнение с версией 4.1 массива GFED.

Модель ИФА РАН воспроизводит площадь выгорания в тропиках Африки и на севере Австралии во всех численных экспериментах (рис. 3 в-з), но с завышением соответствующих значений в Амазонской низменности, центральной Америке, тропических широтах Евразии и юге Африки. Значения площади выгорания занижаются в средних широтах Северной Америки и Евразии.

Глобальные значения площади выгорания из природных пожаров при осреднении за 1997-2013 гг. во всех расчётах составляет от 2.8 до 3.4 млн км² (табл. 2). Эта площадь максимальна в экспериментах с ALL (учет всех типов внешнего воздействия) и GHG (учет воздействия за счет хорошо перемешанных парниковых газов). В свою очередь, A_f минимальна в эксперименте SOL. Следует отметить, что эксперименты с максимальным (минимальным) средним многолетним значением A_f характеризуются и максимальным (минимальным) значением глобальной средней многолетней частоты молний.

Нами оценен коэффициент чувствительности γ , вычисленный с использованием линейной регрессии площади выгорания и зависимость площади выгорания на ЧМ. При использовании данных GFED4.1 для площади выгорания и данных LIS/OTD для частоты молний в 1997-2013 гг. он составляет 0.07 ± 0.06 млн км² с (начальный год расчёта смещён ввиду начала доступности данных GFED4.1; табл. 2) и, с формальной точки зрения, статистически неотличим от нуля на уровне 95%. Однако важным является близость этой центральной оценки с соответствующими оценками в экспериментах ALL, GHG и ALU с моделью. В свою очередь, в остальных экспериментах центральная оценка коэффициента γ заметно меньше указанной, а в эксперименте SOL она является отрицательной. Это указывает на важную роль антропогенных изменений климата в формировании значения указанного коэффициента (при этом возрастает

интервал изменения глобальных значений частоты молний и площади выгорания). Во всех модельных экспериментах статистическая значимость коэффициента γ выше, чем по наблюдениям. Это обусловлено занижением интенсивности межгодовой изменчивости МЗС ИФА РАН.

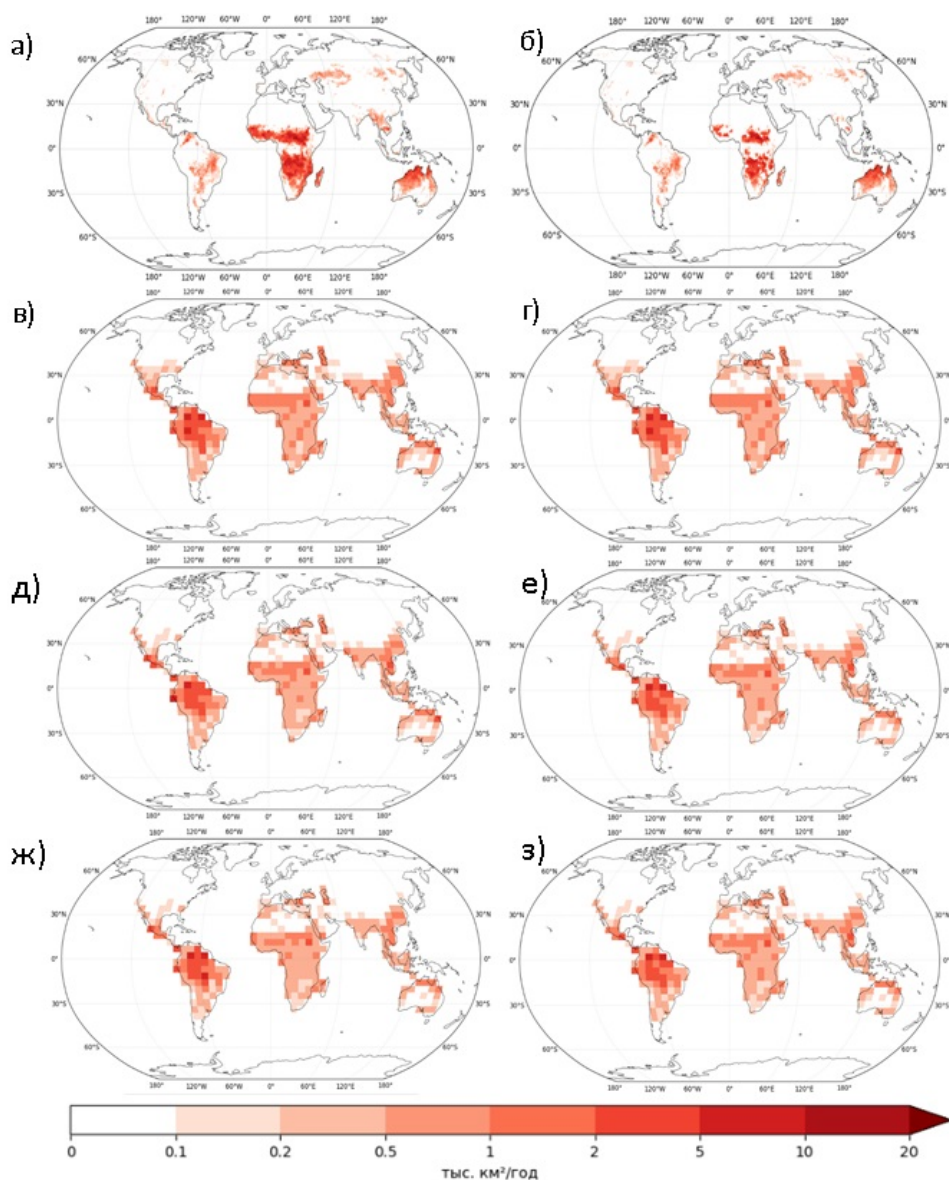


Рисунок 3. Площадь, выгорающая ежегодно в ячейке $1^\circ \times 1^\circ$ ($\text{км}^2/\text{год}$) в среднем за год для 1997-2013 гг. GFED4.1 (а) при исключении регионов с плотностью населения >15 чел./ км^2 (б), по расчетам с МЗС ИФА РАН в экспериментах ALL (в), GHG (г), SO_4 (д), ALU (е), SOL (ж), VOL (з) в среднем за год для 1997-2013 гг.

Figure 3. Annual burned area per $1^\circ \times 1^\circ$ grid cell (km^2/year). Panels show the GFED4.1 annual mean data for 1997-2013 (a), the same data excluding regions with a population density >15 people/ km^2 (b), and IAP RAS EMICAnnual mean simulations for 1997-2013 in the ALL (c), GHG (d), SO_4 (e), ALU (f), SOL (g), and VOL (h) experiments

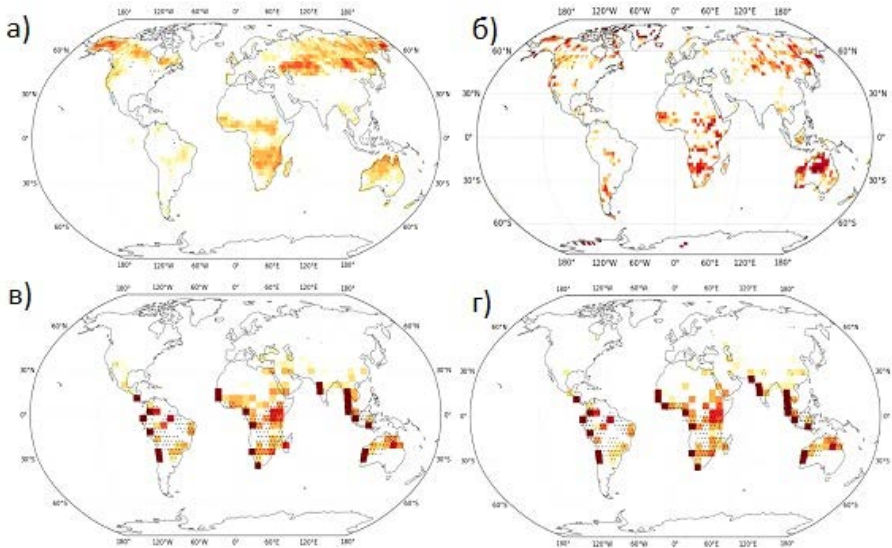
Таблица 2. Среднеглобальные характеристики природных пожаров 1997-2013 гг. В строке с данными GFED в скобках указано значение, получающееся при исключении регионов с плотностью населения 15 чел/км²

Table 2. Global mean wildfire characteristics for 1997-2013. The GFED data row shows the value in parentheses after excluding regions with a population density of 15 people/km²

Данные модель/форсинг	A_f млн км ²	Коэффициент чувствительности γ , (млн км ² с) для межгодовых изменений
GFED4.1, 1997-2013 гг.	4.32 (2.9)	0.07±0.06 (0.03±0.05)
ALL	3.36	0.06±0.01
GHG	3.36	0.05±0.01
SO4	3.08	0.0001±0.08
ALU	2.95	0.05±0.06
SOL	2.83	-0.06±0.05
VOL	2.95	0.01±0.04

Кроме того, согласие модельных результатов – и для средней многолетней площади выгорания, и для коэффициента γ – с оценкой по данным GFED улучшается при исключении регионов с высокой плотностью населения (>15 чел/км² – это порог был выбран субъективно с использованием данных GPWv4 – Gridded Population of the World, Version 4 (Chambers, 2020)), см. табл. 2. В таких регионах большая часть природных пожаров возникает из-за антропогенных источников (Stocks et al., 2002; Ganteaume et al., 2013; Елисеев, Васильева, 2020).

По данным GFED/LIS/OTD на региональном уровне значения коэффициента γ максимальны в средних широтах Евразии и Северной Америки (рис. 4). МЗС ИФА РАН занижает значения этого коэффициента в этих регионах с одновременным завышением в центральной Африке.



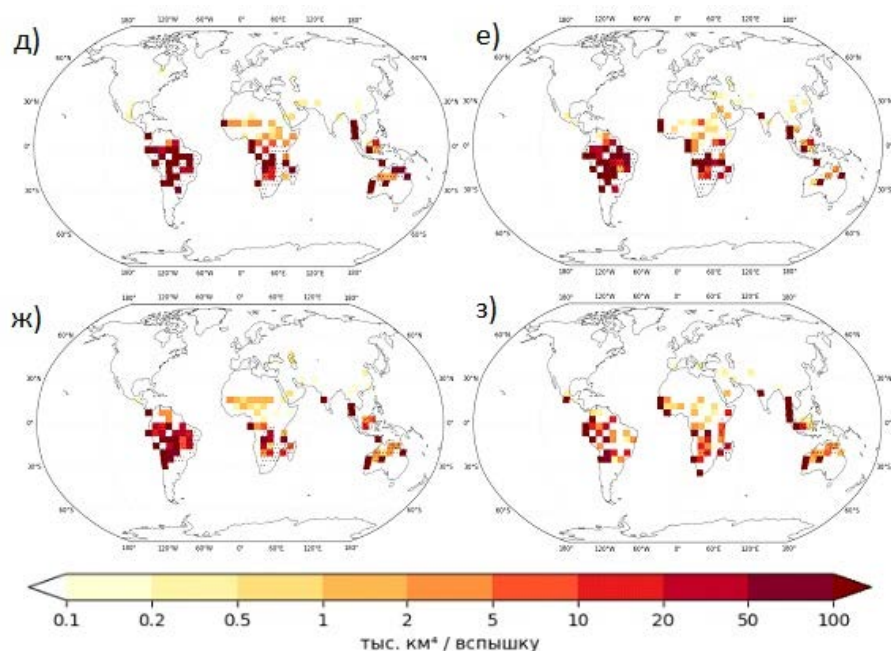


Рисунок 4. Коэффициент чувствительности площади, выгораемой ежегодно, к частоте молний (тыс. км²/вспышку) GFED4.1 и LIS/OTD в 1997-2013 гг. (а) при исключении регионов с плотностью населения >15 чел/км² (б), по расчетам с МЗС ИФА РАН в экспериментах ALL (в), GHG (г), SO₄ (д), ALU (е), SOL (ж), VOL (з) в среднем за год для 1997-2013 гг.

Figure 4. Sensitivity coefficient of the annual burned area to the lightning flash rate (thousand km²/flash). Panels show GFED4.1 and LIS/OTD data for 1997-2013 (a), the same data excluding regions with a population density >15 people/km² (b), and IAP RAS EMIC annual mean simulations for 1997-2013 in the ALL (c), GHG (d), SO₄ (e), ALU (f), SOL (g), and VOL (h) experiments

Закключение

В данной работе проанализированы частота молний и ежегодная площадь выгорания из-за природных пожаров в расчетах с МЗС ИФА РАН при различных видах внешнего (естественного и антропогенного) воздействия на климат для 1996-2013 гг. При этом получено, что:

- Модель в целом реалистично (в сравнении со спутниковыми данными) воспроизводит пространственное распределение частоты молний, но с завышением ЧМ в низких широтах и занижением – в высоких широтах и над океанами.
- Модель некорректно (даже на уровне знака) воспроизводит среднеглобальный коэффициент чувствительности ЧМ к изменению приземной температуры моделью в указанный период. Однако для ряда регионов этот коэффициент воспроизводится при учете воздействия на климат за счёт изменения содержания антропогенных (сульфатных) аэрозолей в тропосфере, что позволяет связать изменения ЧМ в этих регионах с

таким воздействием. В других регионах изменение ЧМ с изменением температуры может быть связано с естественной изменчивостью климата, плохо воспроизводимой современной версией МЗС ИФА РАН (Елисеев и др., 2025). Наконец, модель не учитывает косвенное (связанное с изменением микрофизических характеристик облаков) влияние тропосферных аэрозолей, что может приводить к общей недооценке влияния изменения содержания сульфатов в тропосфере на частоту молний.

- Модель в целом воспроизводит годовую площадь выгорания из-за природных пожаров, но с ошибками в ряде регионов. При этом наилучшее согласие для средней многолетней площади выгорания отмечается для численных экспериментов с учетом антропогенного парникового воздействия на климат.
- Модель не воспроизводит чувствительность площади выгорания из-за ПП к изменению частоты молний – как на глобальном, так и на региональном уровне. Однако важным является близость модельной в экспериментах с учетом антропогенного воздействия с соответствующей эмпирической оценкой. Это указывает на важную роль антропогенных изменений климата в формировании значения указанного коэффициента.
- Согласие модельных результатов (и для средней многолетней площади выгорания, и для коэффициента чувствительности этой площади к изменению частоты молний) – с оценкой по данным наблюдений улучшается при исключении регионов с высокой плотностью населения (>15 чел/км²), где источники возгорания являются не молниевыми, а антропогенными.

Как уже отмечалось, МЗС ИФА РАН не воспроизводит естественной изменчивости климата. С другой стороны, отклик этой модели на естественные воздействия на масштабах от нескольких десятилетий в целом подобен отклику для других моделей с относительно низкой чувствительностью климата к внешним воздействиям. Как следствие, можно сделать предварительный вывод, что ранее выявленные регионы с отрицательной корреляцией между частотой молний и приземной температурой по крайней мере частично связаны с антропогенным воздействием на Земную систему за счёт эмиссий аэрозолей, рассеивающих солнечное излучение. В этом отношении использование МЗС ИФА РАН, несмотря на грубость описания климата в ней, является оправданным за счёт возможности проведения численных экспериментов с различными типами воздействия. В связи с последним отметим, что, например, в условиях численных экспериментов проекта CMIP (Coupled Models Intercomparison Project) различных поколений внешние воздействия на Земную систему объединены в группы, причём рассеивающие солнечное излучение аэрозоли не выделены и находятся в группе с поглощающими солнечное излучение аэрозолями (см., например, <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>). В дальнейшем авторы планируют продолжить соответствующие исследования как с привлечением других моделей, так и статистического анализа данных наблюдений.

Анализ частоты молний выполнен при поддержке Российского научного фонда (проект 25-17-00015). Анализ характеристик природных пожаров выполнен в рамках государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН (рег. № FMWR-2025-0006). Подготовка и обработка данных выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-17-00230.

Список литературы

Аржанов, М.М., Демченко, П.Ф., Елисеев, А.В., Мохов, И.И. (2008) Воспроизведение характеристик температурного и гидрологического режимов почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 44, № 5, с. 591-610.

Елисеев, А.В. (2011) Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 47, № 2, с. 147-170.

Елисеев, А.В., Васильева, А.В. (2020) Природные пожары, данные наблюдений и моделирование, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 73-119, doi:10.21513/2410-8758-2020-3-73-119.

Елисеев, А.В., Мохов, И.И., Аржанов, М.М., Денисов, С.Н., Чернокульский, А.В., Мурышев, К.Е. (2025) Модель Земной климатической системы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, структура и основные результаты, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 61, № 1, с. 47-68. doi:10.31857/S0002351525010044.

Елисеев, А.В., Мохов, И.И., Чернокульский, А.В. (2017) Влияние молниевой активности и антропогенных факторов на крупномасштабные характеристики природных пожаров, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 53, № 1, с. 3-14.

Елисеев, А.В., Плосков, А.Н., Чернокульский, А.В., Мохов, И.И. (2019) Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере, *Доклады Российской академии наук*, т. 485, № 1, с. 76-82.

Елисеев, А.В., Сергеев, Д.Е. (2014) Влияние подсеточной неоднородности растительности на расчёты характеристик углеродного цикла, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 50, № 3, с. 259-270.

Мареев, Е.А. (2010) Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи, *Успехи физических наук*, т. 180, № 5, с. 527-534.

Михайлов, Р.П., Гурьянов, В.В., Елисеев, А.В. (2024) Чувствительность частоты молний к изменениям климата в модели Земной системы низкого пространственного разрешения, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 1, с. 56-75, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-56-75.

Петухов, В.К. (1980) Зональная климатическая модель тепло- и влагообмена в атмосфере над океаном, в кн.: *Физика атмосферы и проблема климата*, Под ред. Г.С. Голицына, А.М. Яглома, М., с. 8-41.

Смышляев, С.П., Мареев, Е.А., Галин, В.Я. (2010) Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 46, № 4, с. 487-504.

Суркова, Г.В. (2002) *Химия атмосферы*, М., 210 с.

Тверской, П.Н. (1964) *Курс метеорологии (физика атмосферы)*. Атмосферное электричество, Л., 698 с.

Чернокульский, А.В., Елисеев, А.В., Козлов, Ф.А., Коршунова, Н.Н., Курганский, М.В., Мохов, И.И., Семенов, В.А., Швець, Н.В., Шихов, А.Н., Ярынич, Ю.И. (2022) Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 27-41, doi:10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

Arora, V.K., Boer, G.J., Friedlingstein, P., Eby, M., Jones, C.D., Christian, J.R., Bonan, G., Bopp, L., Brovkin, V., Cadule, P., Hajima, T., Ilyina, T., Lindsay, K., Tjiputra, J.F., Wu, T. (2013) Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth System Models, *Journal of Climate*, vol. 26, no. 15, pp. 5289-5314, doi:10.1175/JCLI-D-12-00494.1.

Banerjee, A., Archibald, A.T., Maycock, A.C., Telford, P., Abraham, N.L., Yang, X., Braesicke, P., Pyle, J.A. (2014) Lightning NO_x, a key chemistry-climate interaction: impacts of future climate change and consequences for tropospheric oxidising capacity, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, no. 18, pp. 9871-9881, doi:10.5194/acp-14-9871-2014.

Burrows, W.R., Kochtubajda, B., Fricska, G. (2025) Cloud-to-Ground Lightning Trends in Canada and Regions of the United States North of 40°N 1999-2023, *Atmosphere-Ocean*, vol. 63, no. 2, pp. 125-146, doi:10.1080/07055900.2025.2500648.

Chambers, J. (2020) *Hybrid gridded demographic data for the World, 1950-2020* [Data set], Zenodo, doi:10.5281/zenodo.3768003.

Chen, Y., Hall, J., van Wees, D., Andela, N., Hantson, S., Giglio, L., van der Werf, G.R., Morton, D.C., Randerson, J.T. (2023a) *Global Fire Emissions Database (GFED5) Burned Area (0.1)* [Data set], Zenodo, doi:10.5281/zenodo.7668424.

Chen, Y., Hall, J., van Wees, D., Andela, N., Hantson, S., Giglio, L., van der Werf, G.R., Morton, D.C., Randerson, J.T. (2023b) *Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5)*, ESSD, vol. 15, no. 11, pp. 5227-5259, doi:10.5194/essd-15-5227-2023.

Clark, S.K., Ward, D.S., Mahowald, N.M. (2017) Parameterization-based uncertainty in future lightning flash density, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44, no. 6, pp. 2893-2901, doi:10.1002/2017GL073017.

Eliseev, A.V., Coumou, D., Chernokulsky, A.V., Petoukhov, V., Petri, S. (2013) Scheme for calculation of multi-layer cloudiness and precipitation for

climate models of intermediate complexity, *Geosci. Model Dev.*, vol. 6, no. 5, pp. 1745-1765.

Eliseev, A.V., Demchenko, P.F., Arzhanov, M.M., Mokhov, I.I. (2014) Transient hysteresis of near-surface permafrost response to external forcing, *Clim. Dyn.*, vol. 42, no. 5-6, pp. 1203-1215.

Eliseev, A.V., Mokhov, I.I. (2011) Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 28, no. 5, pp. 1215-1232, doi:10.1007/s00376-010-0054-8.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, B., Stouffer, K.E. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, no. 5, pp. 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.

Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., Lampin, C. (2013) A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe, *Env. Manag.*, vol. 51, no. 3, pp. 651-662, doi:10.1007/s00267-012-9961-z.

Guryanov, V.V., Mikhailov, R.P., Eliseev, A.V. (2024) Present-day and future lightning frequency as simulated by four CMIP6 models, *Pure Appl. Geophys.*, vol. 181, pp. 3351-3374, doi:10.1007/s00024-024-03584-6.

Hantson, S., Arneth, A., Harrison, S.P., Kelley, D.I., Prentice, I.C., Rabin, S.S., Archibald, S., Mouillot, F., Arnold, S.R., Artaxo, P., Bachelet, D., Ciais, P., Forrest, M., Friedlingstein, P., Hickler, T., Kaplan, J.O., Kloster, S., Knorr, W., Lasslop, G., Li F., Mangeon, S., Melton, J.R., Meyn, A., Sitch, S., Spessa, A., van der Werf, G.R., Voulgarakis, A., Yue, C. (2016) The status and challenge of global fire modelling, *Biogeosciences*, vol. 13, no. 11, pp. 3359-3375, doi:10.5194/bg-13-3359-2016.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, doi: 10.1002/qj.3803.

Krause, A., Kloster, S., Wilkenskjeld, S., Paeth, H. (2014) The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency, *J. Geophys. Res.. Biogeosciences*, vol. 119, no. 3, pp. 312-322, doi: 10.1002/2013JG002502.

Lasslop, G., Coppola, A.I., Voulgarakis, A., Yue, C., Veraverbeke, S. (2019) Influence of fire on the carbon cycle and climate, *Current Climate Change Reports*, vol. 5, no. 2, pp. 112-123, doi:10.1007/s40641-019-00128-9.

Mangeon, S., Voulgarakis, A., Gilham, R., Harper, A., Sitch, S., Folberth, G. (2016) INFERNO, a fire and emissions scheme for the UK Met Office's Unified

Model, *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, no. 8, pp. 2685-2700, doi:10.5194/gmd-9-2685-2016.

Mareev, E.A., Volodin, E.M. (2014) Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 41, no. 24, pp. 9009-9016, doi:10.1002/2014GL062352.

Muryshev, K.E., Eliseev, A.V., Mokhov, I.I., Timazhev, A.V. (2017) Lead-lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content in dependence of the type and time scale of the forcing, *Glob. Planet. Change*, vol. 148, pp. 29-41.

Pechony, O., Shindell, D.T. (2009) Fire parameterization on a global scale, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 114, no. D16, D16115, doi:10.1029/2009JD011927.

Peterson, M., Mach, D., Buechler, D. (2021) A Global LIS/OTD Climatology of Lightning Flash Extent Density, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 126, no. 14, e2020JD033885, doi:10.1029/2020JD033885.

Price, C., Rind, D. (1992) A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 97, no. D9, pp. 9919-9933.

Price, C., Rind, D. (1994) Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 99, no. D5, pp. 10823-10831, doi: 10.1029/94JD00019.

Price, C.G. (2013) Lightning applications in weather and climate research, *Surv. Geophys.*, vol. 34, no. 6, pp. 755-767, doi:10.1007/s10712-012-9218-7.

Rakov, V.A., Uman, M.A. (2007) *Lightning. Physics and Effects*, Cambridge, 687 p.

Randerson, J.T., Chen, Y., van der Werf, G.R., Rogers, B.M., Morton, D.C. (2012) Global burned area and biomass burning emissions from small fires, *J. Geophys. Res., Biogeosciences*, vol. 117, no. G4, G04012, doi:10.1029/2012JG002128.

Romps, D.M., Seeley, J.T., Vollaro, D., Molinari, J. (2014) Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming, *Science*, vol. 346, no. 6211, pp. 851-854, doi:10.1126/science.1259100.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2012) *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*, Hoboken, 1232 p.

Stocks, B.J., Mason, J.A., Todd, J.B., Bosch, E.M., Wotton, B.M., Amiro, B.D., Flannigan, M.D., Hirsch, K.G., Logan, K.A., Martell, D.L., Skinner, W.R. (2002) Large forest fires in Canada, 1959-1997, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 107, no. D1, 8149, doi:10.1029/2001JD000484.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., Cramer, W. (2001) The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global

Vegetation Model, *Global Ecology and Biogeography*, vol. 10, no. 6, pp. 661-677, doi:10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x.

Thonicke, K., Spessa, A., Prentice, I.C., Harrison, S.P., Dong, L., Carmona-Moreno, C. (2010) The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model, *Biogeosciences*, vol. 6, pp. 1991-2011, doi:10.5194/bg-7-1991-2010.

Tost, H., Jöckel, P., Lelieveld, J. (2007) Lightning and convection parameterisations – uncertainties in global modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 7, no. 17, pp. 4553-4568, doi:10.5194/acp-7-4553-2007.

Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., van Leeuwen, T.T., Chen, Y., Rogers, B.M., Mu, M., van Marle, M.J.E., Morton, D.C., Collatz, G.J., Yokelson, R.J., Kasibhatla, P.S. (2017) Global fire emissions estimates during 1997-2016, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 9, no. 2, pp. 697-720, doi:10.5194/essd-9-697-2017.

Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*, San Diego, 927 p.

Williams, E.R. (2005) Lightning and climate. A review, *Atmos. Res.*, vol. 76, no. 1, pp. 272-287, doi:10.1016/j.atmosres.2004.11.014.

References

Arzhanov, M.M., Demchenko, P.F., Eliseev, A.V., Mokhov, I.I. (2008) Vosproizvedeniye kharakteristik temperaturnogo i gidrologicheskogo rezhimov pochvy v ravnovesnykh chislennykh eksperimentakh s model'yu klimata promezhutochnoy slozhnosti [Simulation of characteristics of thermal and hydrologic soil regimes in equilibrium numerical experiments with a climate model of intermediate complexity], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 44, no. 5, pp. 591-610.

Eliseev, A.V. (2011) Otsenka izmeneniya kharakteristik klimata i uglerodnogo tsikla v XXI veke s uchyotom neopredelyonnosti znacheniy parametrov nazemnoy bioty [Estimation of changes in characteristics of the climate and carbon cycle in the 21st century accounting for the uncertainty of terrestrial biota parameter values], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 47, no. 2, pp. 147-170.

Eliseev, A.V., Vasil'eva, A.V. (2020) Prirodnye pozhary: dannye nablyudenii i modelirovanie [Natural fires: observational data and modelling], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 3, pp. 73-119, doi:10.21513/2410-8758-2020-3-73-119.

Eliseev, A.V., Mokhov, I.I., Arzhanov, M.M., Denisov, S.N., Chernokulsky, A.V., Muryshv, K.E. (2025) Model' Zemnoy klimaticheskoy sistemy Instituta fiziki atmosfery im. A.M. Obukhova RAN, struktura i osnovnye rezul'taty [Earth System Model of the Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences: structure and major results], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 61, no. 1, pp. 47-68, doi:10.31857/S0002351525010044.

Eliseev, A.V., Mokhov, I.I., Chernokulsky, A.V. (2017) Vliyanie molnievoy aktivnosti i antropogennykh faktorov na krupnomasshtabnye kharakteristiki prirodnykh pozharov [The influence of lightning activity and anthropogenic factors on large-scale characteristics of natural fires], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 53, no. 1, pp. 3-14.

Eliseev, A.V., Ploskov, A.N., Chernokulsky, A.V., Mokhov, I.I. (2019) Svyaz' chastoty molniy so statisticheskimi kharakteristikami konvektivnoy aktivnosti v atmosfere [A correlation between lightning flash frequencies and the statistical characteristics of convective activity in the atmosphere], *Doklady Earth Sciences*, vol. 485, no. 1, pp. 76-82.

Eliseev, A.V., Sergeev, D.E. (2014) Vliyanie podsetochnoy neodnorodnosti rastitel'nosti na raschety kharakteristik uglerodnogo tsikla [Impact of subgrid-scale vegetation heterogeneity on the simulation of carbon-cycle characteristics], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 50, no. 3, pp. 259-270.

Mareev, E.A. (2010) Global electric circuit research: achievements and prospects, *Physics-Uspexhi*, vol. 180, no. 55, pp. 504-511.

Mikhailov, R.P., Guryanov, V.V., Eliseev, A.V. (2024) Chuvstvitel'nost' chastoty molniy k izmeneniyam klimata v modeli Zemnoy sistemy nizkogo prostranstvennogo razresheniya [Sensitivity of lightning flash frequency to climate changes in the Earth system model of low spatial resolution], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 1, pp. 56-75, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-56-75.

Petukhov, V.K. (1980) Zonal'naya klimaticheskaya model' teplo- i vlagoobmena v atmosfere nad okeanom [Zonal climate model of heat and moisture exchange in the atmosphere over the ocean], *Fizika atmosfery i problema klimata* [Physics of the atmosphere and the climate problem], in G.S. Golitsyn, A.M. Yaglom (eds.), Nauka, Moscow, Russia, pp. 8-41.

Smyshlyaev, S.P., Mareev, E.A., Galin, V.Ya. (2010) Modelirovanie vliyaniya grozovoy aktivnosti na gazovyy sostav atmosfery [Simulation of the impact of thunderstorm activity on atmospheric gas composition], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 46, no. 4, pp. 487-504.

Surkova, G.V. (2002) *Khimiya atmosfery* [Atmospheric chemistry], Dialog-MGU, Moscow, Russia, 210 p.

Tverskoy, P.N. (1964) *Kurs meteorologii (fizika atmosfery). Atmosfernoye elektrichestvo* [Meteorology course (atmospheric physics). Atmospheric electricity], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 698 p.

Chernokulsky, A.V., Eliseev, A.V., Kozlov, F.A., Korshunova, N.N., Kurgansky, M.V., Mokhov, I.I., Semenov, V.A., Shvets, N.V., Shikhov, A.N., Yarynich, Yu.I. (2022) Opasnye atmosfernye yavleniya konvektivnogo kharaktera v Rossii: nablyudaemye izmeneniya po razlichnym dannym [Hazardous convective weather events in Russia: observed changes according to various data], *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 27-41, doi:10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

Arora, V.K., Boer, G.J., Friedlingstein, P., Eby, M., Jones, C.D., Christian, J.R., Bonan, G., Bopp, L., Brovkin, V., Cadule, P., Hajima, T., Ilyina, T., Lindsay, K., Tjiputra, J.F., Wu, T. (2013) Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth System Models, *Journal of Climate*, vol. 26, no. 15, pp. 5289-5314, doi:10.1175/JCLI-D-12-00494.1.

Banerjee, A., Archibald, A.T., Maycock, A.C., Telford, P., Abraham, N.L., Yang, X., Braesicke, P., Pyle, J.A. (2014) Lightning NO_x, a key chemistry-climate interaction: impacts of future climate change and consequences for tropospheric oxidising capacity, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, no. 18, pp. 9871-9881, doi: 10.5194/acp-14-9871-2014.

Burrows, W.R., Kochtubajda, B., Fricska, G. (2025) Cloud-to-Ground Lightning Trends in Canada and Regions of the United States North of 40° N 1999-2023, *Atmosphere-Ocean*, vol. 63, no. 2, pp. 125-146, doi:10.1080/07055900.2025.2500648.

Chambers, J. (2020) *Hybrid gridded demographic data for the World, 1950-2020* [Data set], Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.3768003.

Chen, Y., Hall, J., van Wees, D., Andela, N., Hantson, S., Giglio, L., van der Werf, G.R., Morton, D.C., Randerson, J.T. (2023a) *Global Fire Emissions Database (GFED5) Burned Area (0.1)* [Data set], Zenodo, doi:10.5281/zenodo.7668424.

Chen, Y., Hall, J., van Wees, D., Andela, N., Hantson, S., Giglio, L., van der Werf, G.R., Morton, D.C., Randerson, J.T. (2023b) *Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5)*, ESSD, vol. 15, no. 11, pp. 5227-5259, doi:10.5194/essd-15-5227-2023.

Clark, S.K., Ward, D.S., Mahowald, N.M. (2017) Parameterization-based uncertainty in future lightning flash density, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44, no. 6, pp. 2893-2901, doi:10.1002/2017GL073017.

Eliseev, A.V., Coumou, D., Chernokulsky, A.V., Petoukhov, V., Petri, S. (2013) Scheme for calculation of multi-layer cloudiness and precipitation for climate models of intermediate complexity, *Geosci. Model Dev.*, vol. 6, no. 5, pp. 1745-1765.

Eliseev, A.V., Demchenko, P.F., Arzhanov, M.M., Mokhov, I.I. (2014) Transient hysteresis of near-surface permafrost response to external forcing, *Clim. Dyn.*, vol. 42, no. 5-6, pp. 1203-1215.

Eliseev, A.V., Mokhov, I.I. (2011) Uncertainty of climate response to natural and anthropogenic forcings due to different land use scenarios, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 28, no. 5, pp. 1215-1232, doi:10.1007/s00376-010-0054-8.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, B., Stouffer, K.E. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental

design and organization, *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, no. 5, pp. 1937-1958, doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., Lampin, C. (2013) A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe, *Env. Manag.*, vol. 51, no. 3, pp. 651-662, doi: 10.1007/s00267-012-9961-z.

Guryanov, V.V., Mikhailov, R.P., Eliseev, A.V. (2024) Present-day and future lightning frequency as simulated by four CMIP6 models, *Pure Appl. Geophys.*, vol. 181, pp. 3351-3374, doi:10.1007/s00024-024-03584-6.

Hantson, S., Arneth, A., Harrison, S.P., Kelley, D.I., Prentice, I.C., Rabin, S.S., Archibald, S., Mouillot, F., Arnold, S.R., Artaxo, P., Bachelet, D., Ciais, P., Forrest, M., Friedlingstein, P., Hickler, T., Kaplan, J.O., Kloster, S., Knorr, W., Lasslop, G., Li F., Mangeon, S., Melton, J.R., Meyn, A., Sitch, S., Spessa, A., van der Werf, G.R., Voulgarakis, A., Yue, C. (2016) The status and challenge of global fire modelling, *Biogeosciences*, vol. 13, no. 11, pp. 3359-3375, doi:10.5194/bg-13-3359-2016.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.

Krause, A., Kloster, S., Wilkenskjeld, S., Paeth, H. (2014) The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency, *J. Geophys. Res.. Biogeosciences*, vol. 119, no. 3, pp. 312-322, doi:10.1002/2013JG002502.

Lasslop, G., Coppola, A.I., Voulgarakis, A., Yue, C., Veraverbeke, S. (2019) Influence of fire on the carbon cycle and climate, *Current Climate Change Reports*, vol. 5, no. 2, pp. 112-123, doi:10.1007/s40641-019-00128-9.

Mangeon, S., Voulgarakis, A., Gilham, R., Harper, A., Sitch, S., Folberth, G. (2016) INFERNO, a fire and emissions scheme for the UK Met Office's Unified Model, *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, no. 8, pp. 2685-2700, doi:10.5194/gmd-9-2685-2016.

Mareev, E.A., Volodin, E.M. (2014) Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 41, no. 24, pp. 9009-9016, doi:10.1002/2014GL062352.

Muryshv, K.E., Eliseev, A.V., Mokhov, I.I., Timazhev, A.V. (2017) Lead-lag relationships between global mean temperature and the atmospheric CO₂ content in dependence of the type and time scale of the forcing, *Glob. Planet. Change*, vol. 148, pp. 29-41.

Pechony, O., Shindell, D.T. (2009) Fire parameterization on a global scale, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 114, no. D16, D16115, doi:10.1029/2009JD011927.

Peterson, M., Mach, D., Buechler, D. (2021) A Global LIS/OTD Climatology of Lightning Flash Extent Density, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 126, no. 14, e2020JD033885, doi:10.1029/2020JD033885.

Price, C., Rind, D. (1992) A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 97, no. D9, pp. 9919-9933.

Price, C., Rind, D. (1994) Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 99, no. D5, pp. 10823-10831, doi:10.1029/94JD00019.

Price, C.G. (2013) Lightning applications in weather and climate research, *Surv. Geophys.*, vol. 34, no. 6, pp. 755-767, doi:10.1007/s10712-012-9218-7.

Rakov, V.A., Uman, M.A. (2007) *Lightning. Physics and Effects*, Cambridge, 687 p.

Randerson, J.T., Chen, Y., van der Werf, G.R., Rogers, B.M., Morton, D.C. (2012) Global burned area and biomass burning emissions from small fires, *J. Geophys. Res., Biogeosciences*, vol. 117, no. G4, G04012, doi:10.1029/2012JG002128.

Romps, D.M., Seeley, J.T., Vollaro, D., Molinari, J. (2014) Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming, *Science*, vol. 346, no. 6211, pp. 851-854, doi:10.1126/science.1259100.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2012) *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*, Hoboken, 1232 p.

Stocks, B.J., Mason, J.A., Todd, J.B., Bosch, E.M., Wotton, B.M., Amiro, B.D., Flannigan, M.D., Hirsch, K.G., Logan, K.A., Martell, D.L., Skinner, W.R. (2002) Large forest fires in Canada, 1959-1997, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 107, no. D1, 8149, doi:10.1029/2001JD000484.

Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., Cramer, W. (2001) The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model, *Global Ecology and Biogeography*, vol. 10, no. 6, pp. 661-677, doi:10.1046/j.1466-822X.2001.00175.x.

Thonicke, K., Spessa, A., Prentice, I.C., Harrison, S.P., Dong, L., Carmona-Moreno, C. (2010) The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model, *Biogeosciences*, vol. 6, pp. 1991-2011, doi:10.5194/bg-7-1991-2010.

Tost, H., Jöckel, P., Lelieveld, J. (2007) Lightning and convection parameterisations – uncertainties in global modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 7, no. 17, pp. 4553-4568, doi:10.5194/acp-7-4553-2007.

Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., van Leeuwen, T.T., Chen, Y., Rogers, B.M., Mu, M., van Marle, M.J.E., Morton, D.C., Collatz, G.J., Yokelson, R.J., Kasibhatla, P.S. (2017) Global fire emissions estimates during 1997-2016, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 9, no. 2, pp. 697-720, doi:10.5194/essd-9-697-2017.

Warneck, P. (2000) *Chemistry of the Natural Atmosphere*, San Diego, 927 p.

Williams, E.R. (2005) Lightning and climate. A review, *Atmos. Res.*, vol. 76, no. 1, pp. 272-287, doi:10.1016/j.atmosres.2004.11.014.

Статья поступила в редакцию (Received): 13.03.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 08.05.2026.

Принята к публикации (Accepted): 27.05.2026.

Для цитирования / For citation

Михайлов, Р.П., Елисеев, А.В., Гурьянов, В.В. (2026) Зависимость температурной чувствительности частоты молний и природных пожаров от типа внешнего воздействия на земную систему по расчётам с моделью ИФА РАН, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 3, с. 384-407, doi:0.21513/2410-8758-2026-3-384-407.

Mikhailov, R.P., Eliseev, A.V., Guryanov, V.V. (2026) Dependence of temperature sensitivity of lightning and wildfire frequency on the type of external forcing on the Earth system as based on IAP RAS model simulations, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 3, pp. 384-407, doi:10.21513/2410-8758-2026-3-384-407.