

УДК 551.510.42:550.424

**ВКЛАД ТРАНСГРАНИЧНОГО АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ****Топчая В.Ю., Котова Е.И., Чечко В.А.***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: piwis@mail.ru*

В работе проанализированы многолетние (2009–2019 гг.) закономерности дальнего переноса воздушных масс и сопутствующих антропогенных примесей для разных сезонов, а также вклад трансграничного атмосферного переноса свинца и кадмия со стороны Западной Европы в загрязнение окружающей среды Калининградской области. Методом расчета обратных траекторий с помощью модели HYSPLIT4 и данных ре-анализа метеорологических элементов NCEP/NCAR рассчитаны 5-суточные обратные траектории движения воздушных масс для центральных месяцев сезонов в течение 10 лет. Также модельный расчет концентраций и потоков Pb и Cd был выполнен для г. Архангельска. Получены результаты сезонных вариаций пространственного распределения функции потенциальных источников  $Z_{ij}$  и их влияния на состав атмосферы вблизи изучаемого региона в соответствующем сезоне. Проанализированы многолетние сезонные вариации содержания Pb и Cd в атмосфере над Калининградской областью и выявлены максимальные значения их концентраций от локальных и трансграничных источников в зимний период. Выявлено, что суммарная среднегодовая концентрация Pb (1581,34 нг/м<sup>3</sup>) для Калининградской области примерно в 2 раза меньше по сравнению с Архангельском (3304,35 нг/м<sup>3</sup>), а по Cd примерно в 3 раза – 127,13 нг/м<sup>3</sup> для Калининградской области и 460,53 нг/м<sup>3</sup> для Архангельска соответственно. При этом максимальные значения потоков Pb и Cd на территорию исследуемого региона отмечены в летний период. Суммарный годовой поток Pb на территорию Калининградской области составляет 22 557,9 мкг/м<sup>2</sup>/год, а Cd – 1836,5 мкг/м<sup>2</sup>/год, при этом % соотношение вклада трансграничных и локальных источников эмиссий Pb и Cd составляет 95/5. Следовательно, трансграничный атмосферный перенос тяжелых металлов с территорий Польши, Германии, Дании и скандинавских стран вносит основной вклад в загрязнение окружающей среды Калининградской области.

**Ключевые слова:** атмосферный перенос, загрязнение окружающей среды, тяжелые металлы, Калининградская область

**CONTRIBUTION OF TRANSBOUNDARY ATMOSPHERIC TRANSPORT OF HEAVY METALS TO ENVIRONMENTAL POLLUTION OF THE KALININGRAD REGION****Topchaya V.Yu., Kotova E.I., Chechko V.A.***Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: piwis@mail.ru*

Analyzes the long-term (2009–2019) patterns of long-range transport of air masses and associated anthropogenic impurities for different seasons was presented, as well as the contribution of transboundary atmospheric transport of Pb and Cd from Europe to environmental pollution in the Kaliningrad region. By calculating the return trajectories using the HYSPLIT4 model and data from the re-analysis of the NCEP/NCAR meteorological elements, 5-day return trajectories of air mass movement for the central months of the seasons for 10 years were calculated. Also, a model calculation of the concentrations and fluxes of Pb and Cd was performed for Arkhangelsk. The results of seasonal variations in the spatial distribution of the function  $Z_{ij}$  and their influence on the composition of the atmosphere near the studied region in the different season are obtained. The long-term seasonal variations of Pb and Cd content in the atmosphere over the Kaliningrad region are analyzed and the max values of their concentrations from local and transboundary sources in winter are revealed. It was found that the total average annual concentration of Pb (1581.34 ng/m<sup>3</sup>) for the Kaliningrad region is about 2 times less than in Arkhangelsk (3304.35 ng/m<sup>3</sup>), and for Cd by about 3 times – 127.13 ng/m<sup>3</sup> for the Kaliningrad and 460.53 ng/m<sup>3</sup> for Arkhangelsk, respectively. At the same time, the max values of Pb and Cd fluxes to the territory of the studied were noted in the summer. The total annual flux of Pb to the the studied region is 22 557.9 mcg/m<sup>2</sup>/year, and Cd is 1836.5 mcg/m<sup>2</sup>/year, while the % of the contribution of transboundary and local sources of Pb and Cd emissions is 95/5. That is, the transboundary atmospheric transport of heavy metals from Poland, Germany, Denmark and the Scandinavian countries makes the main contribution to environmental pollution of the Kaliningrad region.

**Keywords:** atmospheric transport, environmental pollution, heavy metals, Kaliningrad region

Калининградская область, являясь самым западным субъектом Российской Федерации, расположена отдельно от основной территории РФ и находится в окружении европейских государств. Ввиду географического положения и в соответствии с глобальными циркуляционными условиями над территорией Калининградской области преобладает перенос воздушных масс западного и северо-западного направления, т.е. регион находится на пути трансграничного переноса воздушных масс и сопутствующих аэро-

зольных примесей из стран Европы и Скандинавии на территорию европейской части России и акваторию Балтийского моря. Согласно [1], на окружающую среду региона оказывают большее влияние деятельность индустриальных комплексов в странах Западной Европы, нежели промышленных комплексов, расположенных на территории самой области и европейской части России.

Оценка загрязнения атмосферы и антропогенного воздействия на окружающую среду может быть получена как по данным

регулярных мониторинговых наблюдений в течение определенного периода, так и с использованием расчетного мониторинга. На основе расчетов по математическим моделям атмосферного переноса антропогенных загрязнений, используя обобщенные данные о загрязнении атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий районов источников, а также о метеорологических и климатических характеристиках, возможно определить пространственно-временные характеристики загрязнения природной среды региона исследования.

Оценить вклад трансграничного атмосферного переноса загрязняющих веществ в антропогенную нагрузку региона исследования позволяет программа ЕМЕП [2]. Основное направление европейской международной научной программы ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme) состоит в оценке взаимного антропогенного воздействия стран Европы. При этом используются как данные официальной статистики стран-участников и модельные подходы, учитывающие временную изменчивость атмосферной циркуляции, так и результаты реестра источников и реального мониторинга состава атмосферы в рамках самой ЕМЕП.

К приоритетным загрязняющим веществам относятся тяжелые металлы, такие как свинец и кадмий, что объясняется их высокой токсичностью, кумулятивной способностью оказывать негативное влияние на экосистему в целом [3]. Основными источниками эмиссий свинца и кадмия являются выбросы промышленных и энергетических комплексов, сельскохозяйственного производства, а также автотранспорта и других видов транспорта. При этом выброс тяжелых металлов в атмосферу транспортом составляет более половины от всех выбросов. По определению ВОЗ, свинец и кадмий являются самыми опасными тяжелыми металлами природной среды; в соответствии с ГОСТ 17.4.1.02-83 эти токсичные химические элементы относятся к первому классу опасности. Их негативное влияние на окружающую среду и живые организмы проявляется не только при повышении их концентрации в атмосферном воздухе, но и в способности свинца и кадмия накапливаться в живых организмах. Так, например, период полураспада в организме свинца составляет примерно 5 лет, а кадмия – 40 лет [4].

Цель исследования – проанализировать многолетние (2009–2019 гг.) закономерности дальнего переноса воздушных масс и сопутствующих антропогенных примесей

для разных сезонов, а также оценить вклад трансграничного атмосферного переноса свинца и кадмия в загрязнение окружающей среды Калининградской области.

#### Материалы и методы исследования

В основе расчетов дальнего переноса примесей был применен метод статистики траекторий движения воздушных масс, включающий анализ многолетних массивов траекторий переноса воздушных масс и примесей к исследуемому географическому пункту. Используемая методика была разработана в Институте физики атмосферы РАН и усовершенствована в [5], прошла апробацию при оценке антропогенной нагрузки через атмосферу для различных территорий, способна давать уникальную информацию, не противоречащую результатам других научных работ и оценок.

Для расчета обратных траекторий использовались модель HYSPLIT4 и данные ре-анализа метеорологических элементов NCEP/NCAR [6]. Рассчитывались 5-суточные обратные траектории движения воздушных масс, по которым воздух поступает к точке в 00 часов UTC с интервалом расчетов 1 час. Длительность траекторий выбиралась исходя из времени жизни консервативной примеси в атмосфере при ее дальнем переносе. Поскольку длины траекторий значительно превосходят линейные масштабы Калининградской области, траектории рассчитывались для одной точки, заданной на территории области, – 55° с.ш.; 21° в.д. Расчет велся для центральных месяцев сезонов в течение 10 лет (2009–2019 гг.).

На сетке (1°×1°) для каждой ячейки с координатами (*ij*) были рассчитаны значения функции потенциальных источников –  $Z_{ij}$ , характеризующей все атмосферные процессы, определяющие перенос примеси от источника *m* к пункту *n*: вероятность, длительность, дальность, вертикальное осаждение на поверхность и горизонтальное расплывание. При данном подходе она вычисляется следующим образом:

$$Z_{ij} = \frac{n_{ij} t_{ij} * \exp\left(-\frac{K_{ij} t_{ij}}{h_{ij}}\right)}{2\pi N b h_{ij} L_{ij}^2}, \quad (1)$$

где для каждой ячейки (*ij*)  $n_{ij}$  – количество попавших в нее точек траекторий;  $t_{ij}$  – среднее время движения воздуха от нее до региона исследования;  $h_{ij}$  – средняя высота слоя перемешивания, рассчитанная вдоль всех траекторий движения воздуха от ячейки

к заданной точке;  $L_{ij}$  – средняя длина этих траекторий;  $K_{ij}$  – средняя скорость осаждения примеси на поверхность при ее движении от ячейки к Калининградской области. Ввиду того что «концы» обратных пятисуточных траекторий имеют разброс в среднем до 500 км, связанный с изменчивостью метеорологических параметров, область функции  $Z_{ij}$  сглаживалась с учетом разницы длины  $1^\circ$  параллели и меридиана на заданной широте. В результате для расчетов и построения карт использовались сглаженные распределения функции влияния потенциальных источников эмиссий антропогенной примеси. По результатам расчетов были построены карты распределения значений  $Z_{ij}$ , а также выявлены сезонные вариации поступления воздушных масс.

В качестве показателей загрязнения окружающей среды согласно [7] рассчитывалась плотность потоков тяжелых металлов (Pb, Cd) из атмосферы на подстилающую поверхность (на единицу площади) по формуле:

$$F = C \times K \times T, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация примеси в приземном воздухе;  $K$  – скорость осаждения примеси;  $T$  – длительность периода (в данном случае 1 месяц).

Данные об эмиссиях свинца и кадмия в атмосферу с территории Европы выбирались из базы ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation Programme), открытой для интерактивного использования через Интернет. База содержит всю информацию об антропогенных выбросах свинца, кадмия, официально представленную секретариатом Конвенции о Трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния и участниками Конвенции.

Для сравнения вклада локальных и трансграничных источников эмиссий тяжелых металлов в загрязнение окружающей среды нами был произведен модельный расчет концентраций и потоков свинца и кадмия, а также их сезонные вариации для города Архангельска (Архангельской области РФ).

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассчитанные по формуле (1) пространственные распределения значений функции потенциальных источников  $Z_{ij}$  для Калининградской области по четырем сезонам представлены на рис. 1. Ввиду резких пространственных изменений функции  $Z_{ij}$  на картах была применена логарифмическая шкала.

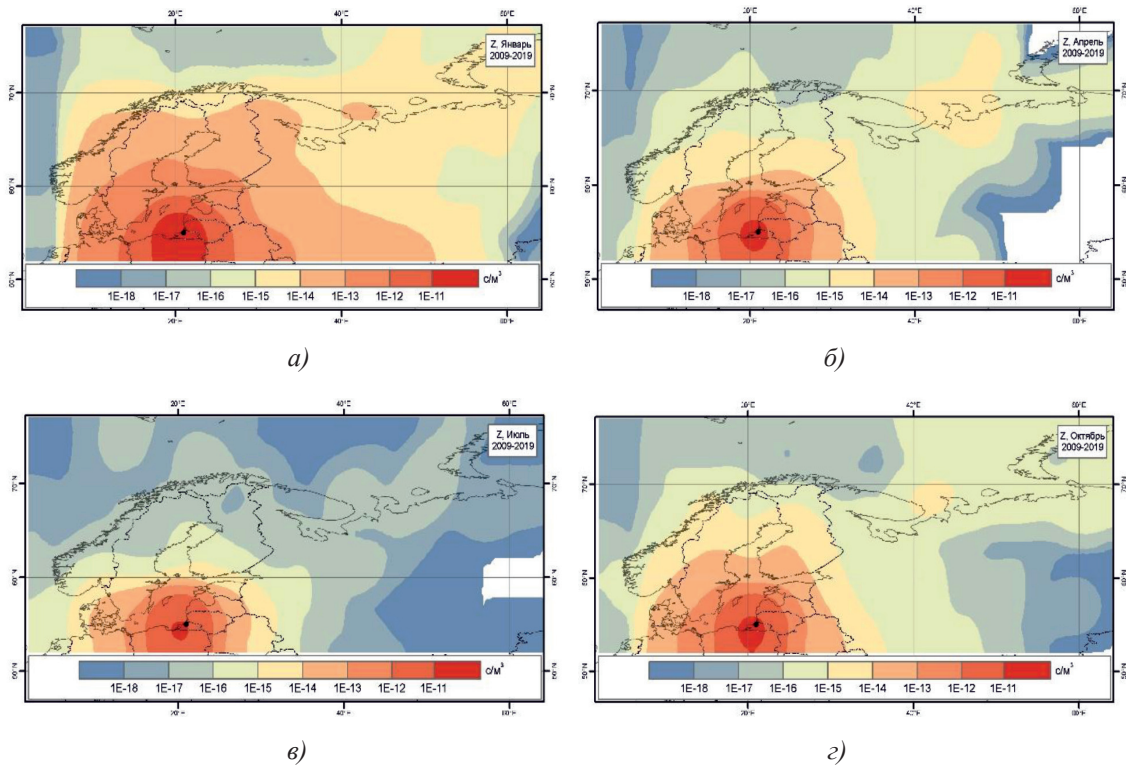


Рис. 1. Карты пространственного распределения значений функции  $Z_{ij}$  для разных сезонов 2009–2019 гг.: а – январь; б – апрель; в – июль; з – октябрь

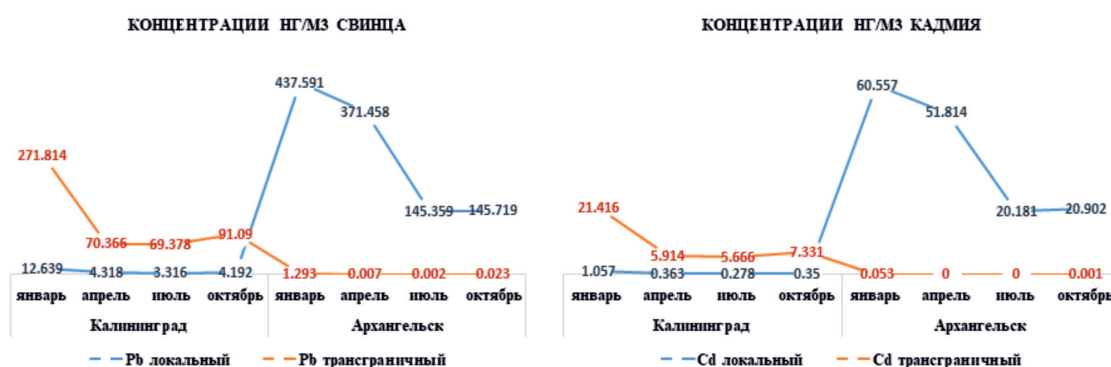


Рис. 2. Сезонные многолетние (2009–2019 гг.) вариации концентраций свинца и кадмия для Калининградской области и Архангельска

Каждое из представленных распределений характеризует потенциальные возможности источников, располагающихся в соответствующих географических точках, влиять на состав атмосферы вблизи изучаемого региона в соответствующем сезоне.

На картах сезонных вариаций средней функции потенциальных источников в зимний период, несмотря на низкую частоту прохождения воздушных масс над исследуемой территорией, интенсивный перенос примесей происходит над обширной территорией, затрагивая западные регионы РФ, а также скандинавские страны. Эффективность переноса загрязнений весной снижается. В летний период поля распределения значений функции  $Z_{ij}$  сильно сжимаются, оставляя возможность эффективно загрязнять территорию Калининградской области лишь самым близлежащим источникам, т.е. перенос примесей происходит с акватории Балтийского моря и прибрежных территорий Польши, Литвы и Латвии. В осенний период происходит расширение области эффективности потенциальных источников, перенос примеси отмечается с территорий скандинавских стран, Польши, Германии, Дании с запада и территорий Литвы, Латвии и Эстонии и Беларуси с востока, а также с акватории Балтийского моря; скорость осаждения примеси на поверхность уменьшается.

При анализе сезонных (2009–2019 гг.) вариаций содержания тяжелых металлов (Pb, Cd) в атмосфере от локальных и трансграничных источников над Калининградской областью и Архангельском выявлено, что максимальные концентрации от обоих источников наблюдаются в зимний период (рис. 2). Данная закономерность также от-

мечалась в работе [8], т.е. сезон года оказывает существенное влияние на процесс переноса воздушных масс и сопутствующей им антропогенной примеси, а именно зимой эффективность переноса загрязнений над исследуемой территорией повышается.

На графиках видно, что вклад трансграничного переноса свинца и кадмия в загрязнение атмосферного воздуха над Калининградской областью значительно превышает выбросы локальных источников на территории региона, а для Архангельска, наоборот, вклад трансграничного переноса ничтожно мал по сравнению с локальными выбросами. При этом суммарная среднегодовая концентрация свинца ( $1581,34 \text{ ng/m}^3$ ) для Калининградской области примерно в 2 раза меньше по сравнению с Архангельском ( $3304,35 \text{ ng/m}^3$ ), а по кадмию – примерно в 3 раза:  $127,13 \text{ ng/m}^3$  для Калининградской области и  $460,53 \text{ ng/m}^3$  для Архангельска.

Результаты сезонных вариаций потоков тяжелых металлов, рассчитанных по формуле (2), представлены в таблице.

В значениях потоков свинца и кадмия из атмосферы по сравнению с их концентрацией в атмосфере наблюдается иная сезонная зависимость. Максимальные значения потоков тяжелых металлов отмечаются в летний период, что связано с большей эффективностью выведения микрочастиц из атмосферы с дождевыми осадками в теплый период года по сравнению с холодным периодом.

Расчет годового потока тяжелых металлов из атмосферы на территорию исследуемого региона в целом характеризует антропогенное воздействие на экосистемы и используется при анализе атмосферного вклада в загрязнение окружающей среды.



Сезонные вариации потоков из атмосферы свинца и кадмия на территорию Калининградской области и Архангельска

Сезоны 2009–2019 гг.	Калининградская область				Архангельск			
	Поток мкг/м <sup>2</sup> /месяц							
	Трансграничный		Локальный		Трансграничный		Локальный	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
Зима	1092,04	86,04	50,78	4,25	5,19	0,21	1758,07	243,29
Весна	1021,38	85,85	62,68	5,26	0,10	0,01	5391,78	752,09
Лето	3419,15	279,21	163,42	13,70	0,07	0,00	7163,66	994,56
Осень	1634,64	131,56	75,22	6,29	0,41	0,02	2614,97	375,09

Суммарный годовой поток Pb на территорию Калининградской области составляет 22 557,9 мкг/м<sup>2</sup>/год, а Cd – 1836,5 мкг/м<sup>2</sup>/год, при этом процентное соотношение вклада трансграничных и локальных источников эмиссий свинца и кадмия составляет 95/5. При сопоставлении полученных результатов с данными расчетов для Архангельска выявлено, что суммарный годовой поток свинца (50 802,8 мкг/м<sup>2</sup>/год) и кадмия (7095,8 мкг/м<sup>2</sup>/год) значительно выше, но при этом основной вклад (99%) в загрязнение окружающей среды через атмосферу вносят локальные источники эмиссий данных тяжелых металлов.

**Заключение**

При анализе многолетних (2009–2019 гг.) сезонных вариаций содержания свинца и кадмия в атмосфере над Калининградской областью выявлены максимальные значения их концентраций от локальных и трансграничных источников в зимний период. При этом вклад трансграничного переноса свинца и кадмия в загрязнение атмосферного воздуха над Калининградской областью значительно превышает выбросы локальных источников, расположенных на территории региона. Суммарная среднегодовая концентрация тяжелых металлов в атмосфере над Калининградской областью составляет 581,34 нг/м<sup>3</sup> свинца и 127,13 нг/м<sup>3</sup> кадмия. Однако максимальные значения потоков свинца и кадмия на территорию исследуемого региона отмечаются в летний период. Суммарный годовой поток Pb на территорию Калининградской области составляет 22 557,9 мкг/м<sup>2</sup>/год, а Cd – 1836,5 мкг/м<sup>2</sup>/год, при этом процентное соотношение вклада трансграничных и локальных источников эмиссий свинца и кадмия составляет 95/5. Следовательно, трансграничный атмосферный перенос тяжелых металлов (Pb, Cd) с территорий Польши, Германии, Дании и скандинавских стран

вносит основной вклад в загрязнение окружающей среды Калининградской области.

*Модельные расчеты и анализ полученных данных выполнялись при поддержке гранта РФФИ р\_мол\_а № 19-45-393007, интерпретация данных выполнялась в рамках госзадания ИО РАН (тема № 0128-2021-0012).*

**Список литературы / References**

1. Топчая В.Ю., Чечко В.А. Потоки вещества из атмосферы в береговую зону юго-восточной части Балтийского моря // Успехи современного естествознания. 2018. № 7. С. 194–199.
2. Topchaya V. Yu., Chechko V. A. Fluxes of matter from the atmosphere to the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic sea // Успехи современного естествознания. 2018. № 7. P. 194–199 (in Russian).
3. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: «Ракурс», 2017. 178 с.
4. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. Heavy metals in ecosystems. Saratov: «Rakurs», 2017. 178 p. (in Russian).
5. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Антропогенная нагрузка на экосистемы Костомукшского природного заповедника: Атмосферный канал. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013. 84 с.
6. Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. Anthropogenic load on the ecosystems of the Kostomuksha Nature Reserve: Atmospheric channel. M.: FIZMATLIT. 2013. 84 p. (in Russian).
7. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 5–20.
8. Vinogradova A.A. Remote assessment of the influence of atmospheric pollution on remote territories // Geofizicheskie processy i biosfera. 2014. Vol. 13. № 4. P. 5–20 (in Russian).
9. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model, NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 05.08.2021).
10. Виноградова А.А., Котова Е.И. Оценка потоков тяжелых металлов из атмосферы на поверхность // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 63–67.
11. Vinogradova A.A., Kotova E.I. Assessment of heavy metal flows from the atmosphere to the surface // Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNCz RAN. 2019. № 16. P. 63–67 (in Russian).
12. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Тяжелые металлы в атмосфере над северным побережьем Евразии: межгодовые вариации зимой и летом // Географические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 4. С. 5–17.
13. Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. Heavy metals in the atmosphere over the northern coast of Eurasia: interannual variations in winter and summer // Geofizicheskie processy i biosfera. 2016. Vol. 15. № 4. P. 5–17 (in Russian).