

## **Development of Automatic Algorithms for Detecting Atmospheric Rivers**

*Dmitry M. Ermakov, Andrey P. Chernushich*

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia  
*dima@ire.rssi.ru*

### **Abstract**

The paper presents an automatic algorithm for the air masses classification by the distribution of the total precipitable water values. Studying the atmosphere over the ocean makes it possible to distinguish three main classes that can be associated with air masses of the lower, high, and middle latitudes, the latter being a dynamic mixture of the first two. The classification is based on the approximation of histograms of the total precipitable water by the sum of four Gaussian functions (modes). Data analysis was performed for all basins of the World Ocean in a continuous interval of observations for the years 2003–2017. The implemented automatic analysis provides progress in studying the structure of atmospheric circulation and, in particular, in detecting and studying the characteristics of atmospheric rivers. In addition the problem of the study of atmospheric circulation over land was briefly addressed.

**Keywords:** atmospheric rivers, air masses classification, satellite radiothermography

## РАЗВИТИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ РЕК

*Д.М. Ермаков, А.П. Чернушич*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино, Россия  
*dima@ire.rssi.ru*

В работе представлен автоматический алгоритм разделения воздушных масс на классы по распределению значений интегрального влагосодержания. При исследовании атмосферы над океаном удастся выделить три основных класса, которые можно связать с воздушными массами нижних, высоких и умеренных широт, причем последние являются динамической смесью двух первых. Классификация построена на аппроксимации гистограмм распределения значений интегрального влагосодержания суммой четырех гауссовых функций (мод). Анализ данных выполнен для всех акваторий Мирового океана в непрерывном интервале наблюдений за 2003 – 2017 гг. Реализованный автоматический анализ обеспечивает прогресс в изучении структуры атмосферной циркуляции и, в частности, в детектировании и исследовании характеристик атмосферных рек. Затронута проблема исследования атмосферной циркуляции над сушей.

**Ключевые слова:** атмосферные реки, классификация воздушных масс, спутниковое радиотепловидение

### Введение

Анализ больших объемов спутниковых данных свидетельствует, что формирование так называемых «атмосферных рек» [1,2] является неотъемлемой особенностью глобальной атмосферной циркуляции. Наиболее отчетливо атмосферные реки проявляются в поле интегрального влагосодержания, представляя собой сравнительно узкие вытянутые «каналы» повышенных относительно фонового уровня значений [3]. Атмосферные реки берут начало в насыщенной влагой внутритропической зоне конвергенции и достигают высоких широт, а в зональном отношении вытягиваются на несколько тысяч километров на восток. Выход атмосферных рек на сушу сопровождается обильными осадками и формированием экстремальных погодных условий [4,5]. Все эти факторы заставляют рассматривать атмосферные реки в качестве важного механизма меридионального и зонального переноса влаги и скрытого тепла в планетарном масштабе.

Остается открытым вопрос о физических принципах формирования и эволюции атмосферных рек. Сам этот термин введен феноменологически и продолжает остро дискутироваться [6]. В качестве одного из способов детектирования атмосферных рек по спутниковым дистанционным данным используют пороговый алгоритм анализа, при котором атмосферной рекой считается связанная область, охватывающая значения интегрального влагосодержания выше определенного уровня. Наибольшие контрасты достигаются, как правило, в поясе средних широт, где в качестве пороговых предложено устанавливать значения порядка  $30 \text{ кг/м}^2$  (или 30 мм в терминах высоты столба осаждаемой влаги). Этот простейший способ, однако, имеет существенные недостатки и далеко не универсален [3].

В то же время, в структуре глобальной атмосферной циркуляции постоянно присутствуют крупномасштабные элементы, внешне выглядящие и развивающиеся как атмосферные реки. Вопрос о том, участвуют ли все эти элементы в активном (существенно превышающем фоновые значения) транспорте атмосферной влаги, требует систематического анализа длинных рядов данных. Крайне актуальна задача развития методики такого анализа по результатам спутниковых наблюдений. Первому этапу предлагаемого авторами решения посвящена настоящая работа. Он заключается в реализации более универсальной, чем предложенные ранее, методики анализа «тонкой структуры» атмосферной циркуляции в поле интегрального влагосодержания атмосферы. С этой целью принята гипотеза о возможности автоматического разделения воздушных масс над океаном на три основных типа по критерию распределения значений интегрального влагосодержания. В соответствии с терминологией, принятой в [7], к этим типам отнесены воздушные массы низких широт (наиболее теплые и насыщенные влагой), воздушные массы высоких широт (наиболее холодные и сухие) и воздушные массы средних (умеренных) широт, являющиеся динамической смесью воздушных масс первых двух типов. Автоматическое выделение воздушных масс умеренных широт с дальнейшим анализом их пространственной структуры в поле интегрального влагосодержания, где следует ожидать максимальных обусловленных атмосферными реками градиентов значений, обеспечит значительный прогресс систематического исследования атмосферных рек в длинных рядах наблюдений.

### Использованные данные и общая постановка задачи

В качестве входной информации для анализа были использованы глобальные поля интегрального влагосодержания атмосферы, полученные над всеми акваториями Мирового океана в непрерывном многолетнем интервале наблюдений с шагом по времени 6 часов. Подробное описание характеристик и методики формирования таких полей на основе данных спутникового радиотеплового мониторинга дано в [8] и цитируемых там работах. Анализ данных выполнялся независимо для нескольких крупных акваторий: северной и южной частей Тихого океана (СТО и ЮТО), Северной и Южной Атлантики (САО и ЮАО), Индийского океана (ИО).

При анализе ряда частных случаев, авторами было отмечено, что характерная гистограмма распределения величин интегрального влагосодержания (ГИВ) над каждой из акваторий может быть хорошо приближена суммой нескольких гауссовых функций, рис. 1.

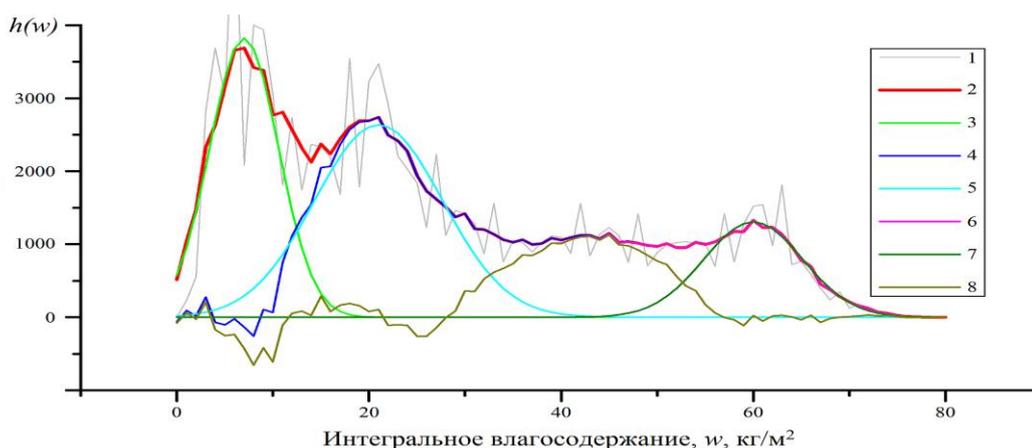


Рис. 1. Последовательная аппроксимация ГИВ гауссовыми модами; кривые на графике: 1 – исходная ГИВ; 2 – сглаженная ГИВ; 3 – первая мода; 4 – не аппроксимированный остаток; 5 – вторая мода; 6 – не аппроксимированный остаток; 7 – четвертая мода; 8 – не аппроксимированный остаток

Это привело к формулировке предварительной гипотезы о том, что каждому из типов воздушных масс (высоких, умеренных и низких широт) отвечает своя мода (гауссово распределение около некоторого низкого, промежуточного и высокого средних значений соответственно) на получаемых ГИВ. В дальнейшем было установлено, что в рассмотренных

случаях оптимальное приближение ГИВ достигается путем суммирования четырех гауссовых функций, две из которых следует отнести к воздушным массам умеренных широт в соответствии с географическим распределением охватываемых ими значений интегрального влагосодержания. Таким образом, при использовании значений интегрального влагосодержания в качестве классифицирующего признака возникла предпосылка для трактовки атмосферы умеренных широт как двухфазовой смеси, никогда не приходящей в однородное состояние вследствие постоянного циркуляционного обмена между тропическими и арктическими (антарктическими) воздушными массами.

Целью настоящей работы была полная автоматизация алгоритма обработки ГИВ, исключающая необходимость подстройки параметров, и его применение к длинным сериям спутниковых измерений. Это позволило исследовать два основных вопроса: состоятельность предположения о наличии четырех главных мод в ГИВ для акваторий, охватывающих воздушные массы низких, умеренных и высоких широт, а также возможность полностью автоматического выделения областей полей интегрального влагосодержания, соответствующих воздушным массам умеренных широт. Последнее, как отмечено выше, имеет существенное значение для автоматического детектирования атмосферных рек в структуре глобальной атмосферной циркуляции.

### Методика обработки

Обработка была проведена для всей последовательности глобальных полей интегрального влагосодержания атмосферы, представленной на геопортале спутникового радиотепловидения (<http://fire.fryazino.net/tpw>) и охватывающей интервал непрерывных наблюдений с 2003 по 2017 гг. На первом шаге обработки указанные поля разделялись на области, соответствующие отдельным крупным акваториям Мирового океана. (Воздушные массы над сушей характеризуются другими распределениями значений интегрального влагосодержания, и вопрос их анализа рассмотрен отдельно). С целью такого разделения вводились постоянные широтные и долготные границы. В качестве нижней широтной границы устанавливался экватор, в качестве верхней – 70° широты северного или южного полушария. Долготные границы настраивались в соответствии с исследуемой акваторией. Схема деления приведена на рис. 2 и резюмирована в Таблице 1.

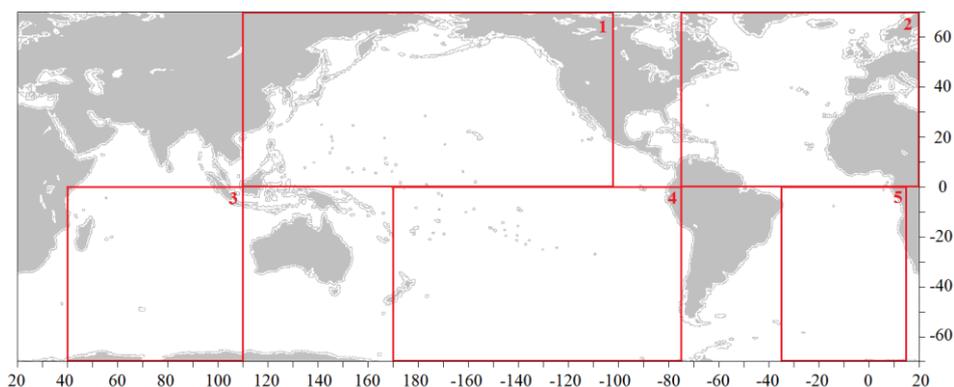


Рис. 2. Схема выбора акваторий (цифры в прямоугольниках – номер акватории в соответствии с Таблицей 1); по краям изображения – географические координаты в градусах

Таблица 1. Характеристика выбранных для анализа акваторий

№	Акватория	Полушарие	Западная граница	Восточная граница
1	Север Тихого океана (СТО)	Северное	110E	102W
2	Северная Атлантика (САО)	Северное	75W	20E
3	Индийский океан (ИО)	Южное	40E	110E
4	Юг Тихого океана (ЮТО)	Южное	170E	75W
5	Южная Атлантика (ЮАО)	Южное	35W	15E

Для каждого глобального поля интегрального влагосодержания из анализируемого временного ряда и для каждой из указанных выше областей выполняли следующую последовательность операций: производили подсчет числа узлов координатной сетки внутри выбранной области с заданным значением интегрального влагосодержания атмосферы как функцию этого значения  $h(w)$  в диапазоне  $w$  от 0 до 80 кг/м<sup>2</sup>. Узлы, соответствующие атмосфере над сушей, не учитывались. В результате формировали ГИВ для заданной акватории и времени наблюдения (с временной дискретностью 6 часов). Построенную ГИВ аппроксимировали суммой четырех гауссовых функций:

$$h(w) \approx \sum_{i=1}^4 A_i \exp\left(-\frac{(w-m_i)^2}{\sigma_i^2}\right) \quad (1)$$

с оптимально подобранными параметрами  $A_i$ ,  $m_i$ ,  $\sigma_i$ . Оптимизацию параметров осуществляли с помощью нелинейного алгоритма Левенберга-Марквардта [9,10]. Полученный набор гауссовых мод упорядочивали по возрастанию их средних значений,  $m_i$ , соответствующие параметры (в первую очередь  $-m_i$ ) выстраивали во временные ряды для дальнейшего анализа. Кроме того, вычисляли абсциссу  $w_{\min}$  точки пересечения первой и второй гауссовых функций и  $w_{\max}$  пересечения третьей и четвертой гауссовых функций. Считая, что эти пределы задают диапазон значений интегрального влагосодержания воздушных масс средних широт, определяли область, занимаемую этими воздушными массами, как множество узлов расчетной сетки с интегральным влагосодержанием в вычисленном диапазоне.

### Алгоритм оптимизации параметров аппроксимации ГИВ

Обозначим совокупность параметров гауссовых мод в (1) вектором  $\mathbf{p}$  (порядок перечисления компонент не имеет значения). Требуется найти набор оптимальных параметров  $\mathbf{p}^*$ , минимизирующий неточность аппроксимации ГИВ  $h(w)$  по критерию наименьших квадратов:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{w=0}^{80} (h(w) - f(\mathbf{p}, w))^2, \quad (2)$$

где  $f(\mathbf{p}, w)$  обозначает сумму гауссовых мод из (1) с параметрами, равными соответствующим компонентам вектора  $\mathbf{p}$ .

Поиск оптимальных значений параметров осуществляется итерационно. Задается некоторый начальный набор значений  $\mathbf{p}^{(1)}$ . На  $i$ -м шаге алгоритма осуществляется коррекция текущего значения  $\mathbf{p}^{(i)}$  на вектор  $\Delta$ , для оценки которого используется линейное приближение:

$$\mathbf{f}(\mathbf{p} + \Delta) \approx \mathbf{f}(\mathbf{p}) + \mathbf{J}\Delta, \quad (3)$$

где  $\mathbf{f}(\mathbf{p}) = \|f(\mathbf{p}, w_j)\|^T$ ,  $\mathbf{J}$  – якобиан  $f$  по  $\Delta$ :

$$\mathbf{J} = \left[ \frac{\partial f(\mathbf{p}, w_j)}{\partial p_i} \right], \quad (4)$$

а дискретный набор значений  $w_j$  из диапазона 0 – 80 кг/м<sup>2</sup> определяется построением ГИВ. Оценка корректирующего шага в алгоритме Левенберга-Марквардта:

$$\Delta = \left( \mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \cdot \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \right)^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{h} - \mathbf{f}(\mathbf{p})), \quad (5)$$

где  $\mathbf{h} = \|h(w_j)\|^T$ ,  $diag(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$  – диагональ матрицы  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ ,  $\mu$  – коэффициент регуляризации. Итерационный цикл останавливается, когда очередная поправка к текущим параметрам оказывается меньше заданного предела.

### Обсуждение результатов

Расчет временных рядов оптимальных параметров аппроксимации ГИВ был выполнен для всех акваторий, перечисленных в Таблице 1, для интервала наблюдений 2003 – 2017 гг. с шагом по времени 6 часов. Во всех случаях было установлено наличие четырех основных гауссовых мод в ГИВ каждой из акваторий. В качестве примера на рис. 3 показаны временные ряды средних значений  $m_i$  гауссовых мод ГИВ для Северной Атлантики.

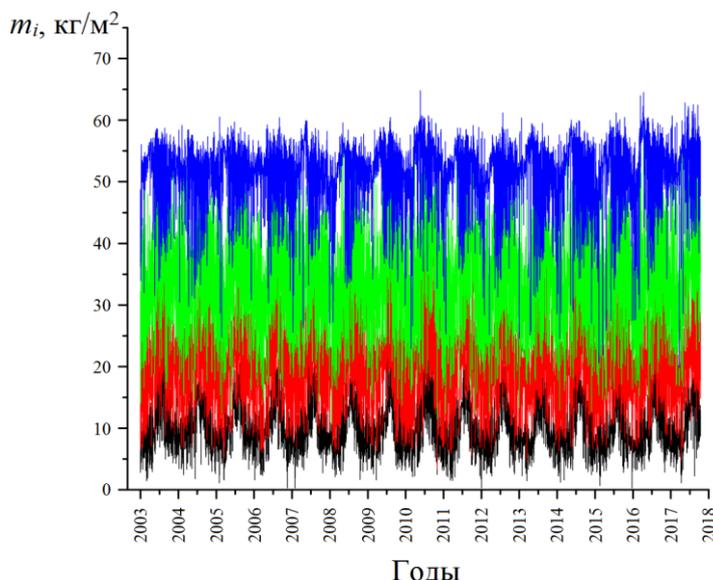


Рис. 3. Временные ряды средних значений  $m_i$  ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) гауссовых мод ГИВ для САО (черная кривая – первая мода; красная – вторая мода; зеленая – третья мода; синяя – четвертая мода)

Из рисунка видно, что построенные временные ряды демонстрируют ярко выраженный сезонный ход (колебания с периодом около 1 года). Такое поведение отмечено для всех рассмотренных акваторий при некоторых отличиях в интервалах колебаний для разных мод. Мода с наиболее высокими значениями среднего соответствует воздушным массам низких широт, а с наиболее низкими – воздушным массам высоких широт. Воздушным массам умеренных широт соответствуют две промежуточные моды. Для подтверждения этого были построены пространственные распределения значений интегрального влагосодержания, соответствующие этим модам (как описано выше).

На рис. 4 в качестве примера приведена выделенная таким образом область воздушных масс умеренных широт над СТО.

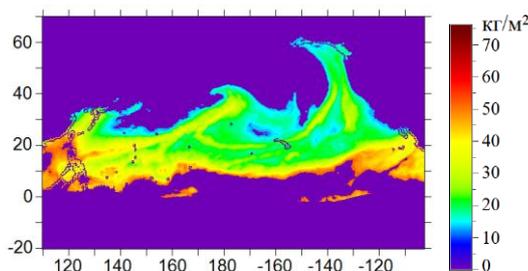


Рис. 4. Воздушные массы умеренных широт СТО в поле интегрального содержания (цветовая шкала в  $\text{кг}/\text{м}^2$  – справа); по краям изображения географические координаты в градусах

Видно, что подавляющее большинство узлов координатной сетки, соответствующих значениям интегрального влагосодержания двух промежуточных гауссовых мод ГИВ, образуют связную область, географически относящуюся к умеренным широтам. Эта закономерность сохраняется при анализе всего рассмотренного временного интервала наблюдений. Следует отметить, что в выделенной таким образом области отчетливо наблюдаются контрасты, связанные с формированием и эволюцией атмосферных рек.

### Возможности исследования атмосферных рек над сушей

В последнее время все больший интерес привлекает задача исследования тонкой структуры глобальной атмосферной циркуляции над сушей, где также отмечается протекание процессов, сходных по своим параметрам с атмосферными реками, см., например, [11]. Существенной трудностью привлечения к анализу данных спутникового радиотеплового зондирования является здесь тот факт, что восстановление поля интегрального влагосодержания над сушей по таким данным дает значительные погрешности. Стандартные подходы, применяемые для обработки данных SSM/I, SSMIS и ряда других спутниковых радиометров, оказываются неудовлетворительными. Более перспективными представляются методы, связанные с интерпретацией поляризационных измерений, например, методика, предложенная в [12] для анализа данных AMSR-E и AMSR2. К сожалению, измерений, выполненных этими приборами, недостаточно для полномасштабного применения алгоритмов спутникового радиотепловидения и получения глобальных геофизических атмосферных полей без пропусков. Тем не менее, комплексирование данных ряда одновременно работающих приборов позволяет получить качественное представление о структуре этих полей и, в частности, обнаруживать продолжения атмосферных рек, уходящие далеко вглубь материков или даже пересекающие их, рис. 5.

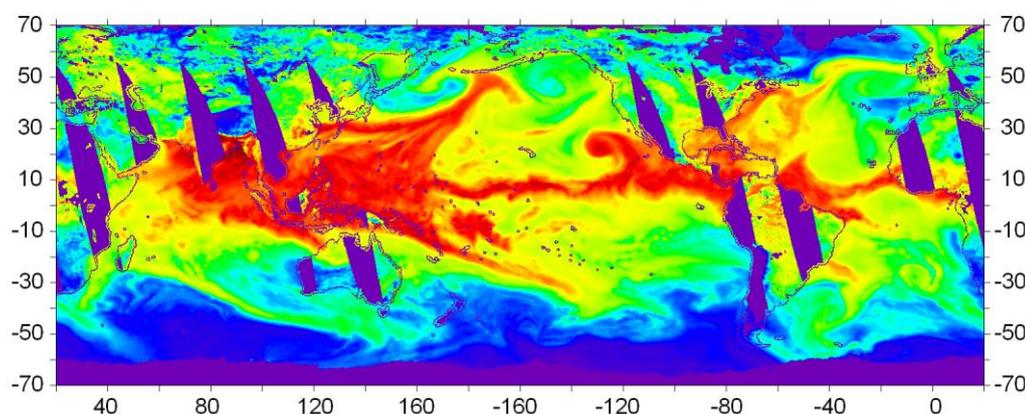


Рис. 5. Глобальное поле интегрального влагосодержания над океаном и сушей по результатам комплексирования данных SSM/I, SSMIS, WindSat и AMSR-2 за 28.06.2013; цветовая шкала значений – как на рис. 4; по краям изображения географические координаты в градусах

Следует рассчитывать, что совершенствование методов восстановления полей интегрального влагосодержания над сушей по данным спутникового радиотеплового мониторинга обеспечит существенный прогресс в исследовании атмосферных рек и структуры глобальной атмосферной циркуляции.

### Заключение

Работа посвящена развитию методов исследования структуры атмосферной циркуляции по данным спутникового радиотеплового мониторинга. Предложен и программно реализован алгоритм автоматической классификации воздушных масс на основе анализа гистограмм

распределения интегрального влагосодержания. Установлено, что в таких гистограммах, построенных над крупными бассейнами Мирового океана, присутствуют четыре гауссовы моды, которые можно связать с воздушными массами низких, высоких и умеренных широт. Разложение гистограмм в виде суммы гауссовых функций основано на оптимизационном алгоритме Левенберга-Марквардта. Обработка данных пятнадцатилетних спутниковых наблюдений показала хорошую устойчивость получаемых параметров аппроксимации и выявила ожидаемые закономерности их сезонных изменений. Развитая методика позволяет автоматически выделять области атмосферы, где проявления атмосферных рек выделяются наиболее отчетливо, что планируется использовать на следующих этапах работы, связанных с детектированием атмосферных рек и оценкой их характеристик (в первую очередь – потоков скрытого тепла) по данным спутникового радиотеплового мониторинга.

Перспективы исследования атмосферной циркуляции над сушей связаны в первую очередь с развитием методов анализа поляризованных радиотепловых измерений. Также существенный интерес представляют возможности комплексирования и совместного анализа радиотепловых дистанционных данных различных спутниковых приборов, выполняющих измерения квазисинхронно.

## References

- [1] Newell R.E., Newell N.E., Zhu Y., Scott C., Tropospheric rivers? – A pilot study, *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(24), pp. 2401–2404. DOI: 10.1029/92GL02916.
- [2] Zhu Y., Newell R.E. Atmospheric rivers and bombs, *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(18), pp. 1999–2002. DOI: 10.1029/94GL01710.
- [3] Wick G.A., Neiman P.J., Ralph F.M., Description and validation of an automated objective technique for identification and characterization of the integrated water vapor signature of atmospheric rivers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4), pp. 2166–2176. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2211024.
- [4] Matrosov S.Y., Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific ocean, *Monthly Weather Review*, 2013, 141(11), pp. 3757–3768. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00324.1.
- [5] Dettinger M.D., Ralph F.M., Das T., Neiman P.G., Cayan D.R., Atmospheric rivers, floods and water resources of California, *Water*, 2011, 3(2), pp. 445–478. DOI: 10.3390/w3020445.
- [6] Knippertz P., Wernli H., A Lagrangian climatology of tropical moisture exports to the Northern Hemispheric extratropics, *Journal of Climate*, 2010, 23(4), pp. 987–1003. DOI: 10.1175/2009JCLI3333.1.
- [7] Palmén E., Newton C.W., *Atmospheric circulation systems: Their structural and physical interpretation*, Academic Press, New York, 1969, 624 p.
- [8] Ermakov D.M., Global circulation of latent heat in the Earth's atmosphere according to data from satellite radiothermography, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, 54(9), pp. 1223–1243. DOI: 10.1134/S000143381809013X.
- [9] Levenberg K., A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, 2, pp. 164–168. DOI: <https://doi.org/10.1090/qam/10666>.
- [10] Marquardt D., An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 1963, 11(2), pp. 431–441. DOI: 10.1137/0111030.
- [11] Komatsu K.K., Alexeev V.A., Repina I.A., Tachibana Y., Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air, *Scientific reports*, 2018, 8(2872). DOI: 10.1038/s41598-018-21159-6.
- [12] Du J., Kimball J.S., Jones L.A., Kim Y., Glassy J., Watts J.D., A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations, *Earth System Science Data*, 2017, 9(2), pp. 791–808. DOI: 10.5194/essd-9-791-2017.