

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 470—492.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 470—492.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.131.11:[621.396.969:629.78]

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492

Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения

***Дмитрий Михайлович Ермаков^{1,2}, Евгений Владимирович Пашинов¹,
Алексей Владимирович Кузьмин¹, Сергей Александрович Втюрин¹,
Андрей Петрович Чернушич²***

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, d.m.ermakov@cosmos.ru

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.

Аннотация. Рассмотрен новый подход к анализу элементов регионального гидрологического баланса на основе данных спутникового радиотеплового мониторинга Земли. Благодаря использованию алгоритмов спутникового радиотепловидения становится возможным получить ряды полного влагосодержания атмосферы над заданной территорией и поток водяного пара через ограничивающий ее контур. В работе проанализированы базовые математические соотношения подхода в контексте дистанционных методов исследования Земли, рассмотрены наиболее перспективные для использования спутниковые средства наблюдения и алгоритмы обработки данных, приведены результаты сравнения влагосодержания и горизонтального потока водяного пара с архивом ECMWF Era5.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, спутниковое радиотепловидение, влагосодержание атмосферы, горизонтальный поток водяного пара.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИКИ РАН (тема «Мониторинг», гос. рег. № 122042500031-8) в части расчетов полей интегрального влагосодержания и адвекции водяного пара, а также ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (тема «Космос-2» гос. рег. № 0030-2019-0008) в части математической формализации подхода и расчета элементов гидрологического баланса.

Для цитирования: Ермаков Д. М., Пашинов Е. В., Кузьмин А. В., Втюрин С. А., Чернушич А. П. Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 470—492. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.

Original article

The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermvision

***Dmitry M. Ermakov^{1,2}, Evgeny V. Pashinov¹, Sergey A. Vturin¹,
Alexey V. Kuzmin¹, Andrey P. Chernushich²***

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, d.m.ermakov@cosmos.ru

² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Moscow region

Summary. A new approach to the analysis of the elements of the regional hydrological balance based on the data of satellite radiothermal monitoring of the Earth is considered. Due to the use of satellite radiothermvision algorithms, it becomes possible to obtain series of the total moisture content of the atmosphere over a given territory and the flux of water vapor through the contour limiting it. This makes it possible to calculate two of the three components of the atmospheric moisture balance equation: the change in total moisture content with time and the convergence of water vapor. The closure of the balance equation is “effective evaporation” (the difference between evaporation and precipitation), which, therefore, knowing the remaining components, can be easily calculated integrally for a given territory and a selected observation time interval. Analyzed are the basic mathematical relations of the approach in the integral form in the context of remote sensing methods of Earth exploration. The most promising satellite observation tools to be applied in the presented approach are considered: they are multichannel passive microwave radiometers (AMSR, MTVZA, SSM/I, SSMIS series). The data processing algorithms, used in frames of the approach are presented and briefly discussed, including that for retrieving precipitable water vapor (PWV) over land from SSMIS data, and that for calculating water vapor advective fluxes based on optical flow algorithm applied to chronological sequence of PWV fields.

In order to illustrate the applicability and potential advantages of the approach an example of preliminary calculations is given for the catchment of the Ob River. The elements of a 10-year hydrological balance for the four selected regions within the Ob River catchment are evaluated and, based on them the resulting yearly “effective hydration” of the territory is estimated and compared with estimations from reanalysis (ECMWF Era5) and independent measurements of the annual runoff at the mouth of the Ob. All estimates are comparable by the order of magnitude, satellite ones being somewhat above while reanalysis being below the latter ones.

Keywords: Regional hydrological balance, microwave radiometry, satellite radiothermvision

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignments of the IKI RAS (“Monitoring”, state. reg. No. 122042500031-8) in part of calculating the fields of precipitable water vapor content and water vapor advection, as well as IRE RAS (“Kosmos-2” state. reg. No. 0030-2019-0008) in part of mathematical formalization of the approach and calculation of elements of the hydrological balance.

For citation: Ermakov D. M., Pashinov E. V., Vturin S. A., Kuzmin A. V., Chernushich A. P. The concept of calculating the elements of the regional hydrological balance with the use of satellite radiothermvision. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 470—492 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-470-492.

Введение

Изменения параметров гидрологического цикла являются одними из важных следствий и индикаторов региональной и глобальной климатической изменчивости

[1]. Развитие методов расчета и прогнозирования изменений этих параметров представляют интерес не только с фундаментальной, но и с научно-прикладной точки зрения. Увлажнение территории и его динамика обуславливают как текущее состояние, так и возможную трансформацию экосистемы; во многом определяют величину речного стока как компоненты гидрологического цикла [2, 3]; при формировании аномальных погодных условий создают риски развития наводнений или засух. Так, по данным Европейского агентства по окружающей среде [4], наводнения в Европе привели к экономическим потерям в 60 млрд. евро и гибели 1126 человек в период с 1998 года по 2009 год [5], что инициировало разработку Европейской системы оповещения о наводнениях [6, 7]. Аналогичные системы развиваются и в России [8]. Известно, например, что сильные наводнения на Амуре вызываются затяжными осадками [9—12]. Тем не менее, публикации, обсуждающие вопросы развития средств анализа и прогноза изменений элементов регионального гидрологического цикла, в том числе в связи с изменениями речного стока и уровня водоемов, для территорий России по-прежнему сравнительно редки [1, 13, 14].

В цитированных работах рассмотрены два основных методических подхода к оперативному и долгосрочному анализу компонент гидрологического цикла: на базе прямых измерений на аэрологических станциях и с помощью оценок по реанализу. Очевидным недостатком первого подхода является редкость и неравномерность измерений по пространству. Второй подход опирается на процедуру усвоения данных разнородных измерений в сложных циркуляционных моделях, и его результаты нуждаются в проверке с использованием репрезентативных объемов независимых фактических наблюдений. В настоящей работе рассмотрена концепция третьего подхода, основанного на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутникового радиотеплового мониторинга. Его результаты, таким образом, можно считать в значительной степени независимыми от двух других подходов (при сделанных ниже оговорках) и опирающимися исключительно на данные фактических (дистанционных) наблюдений.

Логика этой концепции отражена в структуре работы. В первом разделе даны основные соотношения, описывающие взаимосвязь элементов гидрологического цикла. В отличие от исследований [1, 15], где эквивалентные им соотношения представлены в дифференциальной форме, в данной работе отдано предпочтение интегральной форме, которая делает связь с дистанционно измеряемыми параметрами атмосферы более очевидной. В следующих двух разделах представлены основные возможности получения критически важных для реализации подхода атмосферных параметров (интегрального влагосодержания атмосферы и интегрированного по высоте атмосферы горизонтального потока водяного пара) по данным спутниковых наблюдений. В заключении изложены основные результаты, проблемы и перспективы предложенного подхода.

Интегральное представление уравнения водного баланса атмосферы

Для консервативной величины (например, общего содержания воды во всех фазовых состояниях) в заданном объеме атмосферы справедливо соотношение:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V a(x, y, z) \cdot dx dy dz = \oiint_S \bar{F}(x, y, z) d\bar{S}, \quad (1)$$

где $a(x, y, z) dx dy dz$ — масса (воды) в элементарном объеме $dx \times dy \times dz$ с координатами (x, y, z) ; V — рассматриваемый объем, окруженный замкнутой поверхностью S ; $\bar{F}(x, y, z) = a(x, y, z) \vec{v}(x, y, z)$, $\vec{v}(x, y, z)$ — вектор скорости движения (элементарного объема воздуха); $d\bar{S}$ — ориентированная элементарная площадка поверхности, причем направление нормали выбрано внутрь рассматриваемого объема. Таким образом, в левой части уравнения (1) стоит изменение со временем полной массы водяного пара в объеме V , в правой — полный поток атмосферной влаги через охватывающую этот объем поверхность (положительному потоку соответствует конвергенция потока влаги внутрь границ).

В частном случае наблюдений Земли из космоса возникает выделенное направление в надир, что можно отразить в уравнении (1) путем выбора порядка интегрирования:

$$\frac{d}{dt} \iint_A dx dy \int_0^{+\infty} a(x, y, z) dz = \oiint_{S/A} \bar{F}(x, y, z) d\bar{S} + \oiint_A \bar{F}(x, y, z) d\bar{S}, \quad (2)$$

где рассмотрен объем с бесконечно высокими вертикальными стенками и основанием A на поверхности Земли. В этом случае в левой части уравнения возникает величина $Q(x, y) = \int_0^{+\infty} a(x, y, z) dz$ — интегральная по высоте атмосферы масса

воды во всех фазовых состояниях на единицу площади поверхности, a — абсолютная влажность в $г/м^3$. Как известно, подобные интегральные величины во многих случаях восстанавливаются по дистанционным данным гораздо более надежно, чем их вертикальные распределения [16, 17]. В правой части уравнения (2) интеграл потока разделен на две компоненты. Вторая — вертикальный поток воды через горизонтальную площадку A на поверхности Земли, т.е. так называемое «эффективное испарение», $E - P$, где E — интенсивность испарения с площадки A , в $кг/с$; P — интенсивность осадков, приходящихся на ту же площадку, в $кг/с$. Первая компонента правой части уравнения (2) — поток через оставшуюся часть границы, который в данном случае соответствует горизонтальному потоку через вертикальные стенки, причем поток через бесконечно высокую часть граничной поверхности, параллельную A , можно считать равным нулю:

$$\oiint_{S/A} \bar{F}(x, y, z) d\bar{S} = \oint_l d\vec{n} \int_0^{+\infty} a(x, y, z) \vec{v}(x, y, z) dz, \quad (3)$$

где $d\vec{n}$ — внутренняя нормаль к границе l области A на поверхности Земли, равная по модулю длине соответствующего элемента контура интегрирования. Таким образом, можно ввести величину $\bar{F}_a(x, y) = \int_0^{+\infty} a(x, y, z) \vec{v}(x, y, z) dz$ — интегрированный по высоте горизонтальный поток атмосферной влаги во всех фазовых

состояниях (вертикальная компонента потока равна 0 при скалярном умножении на $d\vec{n}$).

Интегрирование уравнения (2) по времени дает с учетом (3) и введенного обозначения $\bar{F}_a(x, y)$:

$$\iint_A Q(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n} + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} (E - P) dt. \quad (4)$$

Величина в левой части уравнения (4) — изменение полной массы атмосферной влаги над областью A , произошедшее в интервале между начальным t_{\min} и конечным t_{\max} моментами времени (интеграл по площади и по времени наблюдений). Оно частично объясняется горизонтальным притоком (оттоком) влаги через ограничивающие область A вертикальные стенки (первое слагаемое в правой части уравнения) и частично — эффективным испарением с поверхности A за весь рассмотренный интервал времени (второе слагаемое). Центральный интерес в данном случае представляет последнее слагаемое. Остальные слагаемые, как показано ниже, могут быть восстановлены по данным дистанционного зондирования Земли в микроволновом диапазоне.

Сделав перестановку слагаемых в (4), получим:

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} (P - E) dt = - \iint_A Q(x, y) dx dy \Big|_{t_{\min}}^{t_{\max}} + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n}. \quad (5)$$

Легко убедиться, что полученное уравнение эквивалентно стандартному уравнению баланса влаги в дифференциальной форме. Для этого уравнение (5) необходимо продифференцировать по пространственным и временным координатам, т.е. перейти к бесконечно малому интервалу времени $t_{\max} - t_{\min} = dt$ и бесконечно малой площадке $dA = dx dy$ и разделить обе части (5) на dt и dA . Получим:

$$\frac{(P - E) dt}{dt \cdot dA} = - \frac{Q(x, y) \Big|_{t_{\max}} - Q(x, y) \Big|_{t_{\min}}}{dt} + \frac{\oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n}}{dA}. \quad (6)$$

По теореме Остроградского-Гаусса $\oint_l \bar{F}_a(x, y) d\vec{n} = -\text{div} \bar{F}_a(x, y) d\vec{n}$. Знак «минус» обусловлен выбором положительного направления нормали (внутрь контура), интеграл заменен произведением в силу бесконечной малости области интегрирования dA . Окончательно с перестановкой слагаемых получим:

$$\frac{\partial Q(x, y)}{\partial t} + \text{div} \bar{F}_a(x, y) = e(x, y) - p(x, y), \quad (7)$$

где $e - p$ имеет смысл эффективного испарения, отнесенного к единице площади; все члены уравнения (7) имеют размерность $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$. В представленном виде (7) полностью эквивалентно стандартному уравнению водного баланса атмосферы (см., например, уравнение (1) в работе [1]).

Таким образом, «увлажнение территории», понимаемое величиной, обратной эффективному испарению $E - P$, может быть получено как остаток в балансовом уравнении (5). Для этого необходимо регулярно, с удовлетворительной

периодичностью, восстанавливать величины $Q(x,y)$ и $\overline{F}_a(x,y)$. Важно, что «увлажнение территории» будет вычислено интегрально по всей площади A , что выгодно отличает эту величину от данных наземных станций наблюдений, и интегрально по интервалу времени наблюдения $[t_{\min}, t_{\max}]$, что выгодно отличает ее от «мгновенных» спутниковых оценок интенсивности осадков. Дополнительно отметим, что величину $Q(x,y)$ (общее содержание атмосферной влаги в вертикальном столбе единичной площади) достаточно знать только на концах временного интервала, а величину $\overline{F}_a(x,y)$ (интегрированный по высоте поток атмосферной влаги) — только на границе l области A . Однако, как будет видно из дальнейшего описания подхода, алгоритмически проще и универсальнее реализовать расчет обеих величин на регулярной координатной сетке с постоянным шагом по времени.

Кроме того, при рассмотрении годовых интервалов времени (для устранения сезонного хода и в целях сопоставления с независимо измеряемыми характеристиками, например, годовым речным стоком) слагаемое в левой части уравнения (4) можно считать в первом приближении равным нулю. Тогда «увлажнение территории» $P-E$ определяется левым слагаемым в правой части уравнения (4) — «накопленной конвергенцией». Определяющий вклад в «накопленную конвергенцию» дает горизонтальный перенос водяного пара, масса которого в вертикальном столбе атмосферы превышает на один-два порядка массу воды в других фазовых состояниях. В связи с этим под $a(x,y,z)$ будем понимать абсолютную влажность воздуха (массу водяного пара в единичном объеме), а под $Q(x,y)$ — интегральное влагосодержание атмосферы, соответственно.

Восстановление интегрального влагосодержания над сушей по данным спутникового радиотеплового зондирования

Для мониторинга полей атмосферных параметров из космоса традиционно применяются многоканальные СВЧ спектрометры-поляриметры [16, 17]. При этом задачу восстановления полей интегрального влагосодержания атмосферы над океаном можно считать на фундаментальном уровне успешно решенной [18]. Точность получаемых значений удовлетворяет критериям, предъявляемым большинством практических приложений, а основные потребности текущего этапа развития заключаются в улучшении пространственно-временной детальности наблюдений. Это обусловлено, прежде всего, тем обстоятельством, что свойства подстилающей поверхности в системе «океан-атмосфера» могут быть описаны малопараметрической моделью, включающей температуру и соленость поверхностного слоя океана, а также шероховатость поверхности, параметризованную скоростью приводного ветра [18]. Важно также, что в терминах этих параметров поверхность океана является достаточно однородной на масштабах пятна разрешения.

Ситуация радикально меняется при переходе к системе «суша-атмосфера». В этом случае подстилающая поверхность характеризуется большим разнообразием свойств, способных резко меняться на пространственных масштабах,

существенно меньших пятна разрешения спутниковых приборов (растительный покров, почвенный покров, грунты, области открытой воды, снежный покров, антропогенные объекты и т.д.) и испытывающих специфические изменения в диапазоне от внутрисуточных до межгодовых интервалов времени.

Задача восстановления интегрального влагосодержания над сушей требует дальнейшего развития и совершенствования методик обработки данных спутниковых СВЧ спектрометров-поляриметров, которые остаются одним из наиболее перспективных средств дистанционного мониторинга полей атмосферных параметров в силу известных свойств всепогодности, круглосуточности и возможности обеспечить полное покрытие поверхности Земли наблюдениями за одни сутки при одновременном использовании двух-трех идентичных приборов. Рассмотрим методы восстановления влагосодержания с помощью различных спутниковых приборов.

AMSR

Методика восстановления интегрального влагосодержания по данным приборов серии AMSR метеорологического агентства JAXA – AMSR-E на спутнике Aqua [19] и AMSR2 на спутнике GCOM-W1 [20] развита в работах [21, 22]. Одной из важных особенностей приборов этой серии была возможность приема излучения на двух перпендикулярных поляризациях на близких частотах 18,7 и 23,8 ГГц по разные стороны от линии резонансного поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Поляризационные контрасты, формируемые подстилающей поверхностью на этих двух частотах, по-разному ослабляются в атмосфере за счет поглощения части излучения водяным паром. В итоге измеряемое со спутника соотношение этих контрастов характеризует общее содержание водяного пара в атмосфере. Качество восстановления интегрального влагосодержания по разработанной методике оценивалось путем сопоставления с данными независимых измерений ИК зондировщиком AIRS. Установлено, что корреляция двух рядов данных составляет $r = 0,91$ при среднеквадратичной невязке 4,94 кг/м².

Специального анализа того, какой из рядов данных содержал погрешности, обусловившие больший вклад в итоговую невязку, не проводился. Сложность такого анализа связана, в частности, с тем, что методика обработки данных AIRS обеспечивает восстановление вертикальных профилей удельной влажности, которые требуют пересчета в интегральное влагосодержание, а при оценке качества результатов обработки данных AIRS выполнялось сопоставление самих вертикальных профилей с данными радиозондов и реанализа [23]. Следует также отметить, что расчеты по данным AIRS затруднены или невозможны в условиях облачности.

Поля интегрального влагосодержания атмосферы по данным AMSR-E/2 строились дважды в сутки на сетке с пространственным шагом 25 км [21, 22]. С точки зрения рассматриваемой ниже методики восстановления полей адвекции водяного пара, основным недостатком этих данных было неполное покрытие Земли суточными измерениями, обусловленное тем, что оба прибора функционировали на орбите в единственных экземплярах на неперекрывающихся интервалах времени.

МТВЗА

Российские приборы серии МТВЗА-ГЯ [24], устанавливаемые на спутниках серии Метеор-М, обладают с точки зрения набора спектральных каналов расширенными возможностями по сравнению с представленными выше приборами серии *AMSR*. Данные МТВЗА-ГЯ в целом характеризуются высоким качеством измерений и имеют большие перспективы использования в различных приложениях, например, [25—28]. Однако их широкому использованию препятствует отсутствие свободно распространяемых продуктов стандартных уровней обработки, в частности полей калиброванных яркостных температур с точной географической привязкой. Авторы данной работы входят в состав научного коллектива, последовательно реализующего этапы создания таких продуктов [29, 30] и их распространения на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [31].

SSM/I

Приборы серии *SSM/I* [32], устанавливавшиеся на спутниках серии *DMSP* (NASA, США), долгое время оставались эталоном долгосрочных стабильных однородных по качеству СВЧ-радиометрических измерений. В разные годы на орбите присутствовало до трех экземпляров *SSM/I*, функционирующих одновременно. Это гарантировало полное покрытие Земли измерениями дважды в сутки (на восходящих и нисходящих частях орбит). Основной проблемой приборов *SSM/I* с точки зрения задачи восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей являлось отсутствие возможности приема горизонтально поляризованного излучения на частоте 22,235 ГГц (по аналогии с каналом 23,8 ГГц приборов *AMSR*). Анализ длинных рядов данных *SSM/I* в сопоставлении с синхронными и пространственно-совмещенными данными *AMSR* показал [33], что получение общей картины распределения интегрального влагосодержания атмосферы над сушей хотя и возможно, однако среднеквадратичная невязка между указанными рядами данных составляет около 10 кг/м², что неприемлемо для большинства приложений.

SSMIS

Для восстановления интегрального влагосодержания атмосферы (*precipitable water vapor, PWV*) традиционно используются измерения вблизи линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Такие измерения хорошо пригодны для восстановления *PWV* над поверхностью воды, но мало пригодны для восстановления над сушей. Причиной этого является большая величина излучательной способности покровов суши и достаточно слабая поглощающая способность атмосферы в области 22 ГГц. Изменение излучения атмосферы водяным паром на 22 ГГц практически невозможно различить на фоне ярких покровов суши, обладающих сильной изменчивостью излучательной способности.

Решением данной проблемы может быть использование дополнительных измерений на частотах с более сильным поглощением в атмосферном водяном паре в диапазоне 150–200 ГГц. Такой возможностью обладают радиометры серии

SSMIS, функционирующие одновременно на нескольких спутниках (DMSP F16, F17, F18), и выполняющие наблюдения в близкое местное время. SSMIS имеет 24 радиометрических канала на частотах от 19 до 200 ГГц и конический тип сканирования под углом 53° [34].

Для восстановления PWV по данным SSMIS могут быть использованы два подхода: физический и статистический. Физический подход заключается в решении некорректной обратной задачи на основе модели переноса излучения и дополнительной априорной информации о состоянии подстилающей поверхности. Статистический — в установлении функциональной зависимости различными математическими методами между одновременными спутниковыми измерениями излучения и подспутниковыми независимыми измерениями водяного пара. В настоящий момент статистический подход становится одним из основных в решении подобных задач благодаря большому объёму накопленных метеорологических данных наземных станций и продуктов их обработки. В данной работе была использована технология искусственных нейронных сетей (ИНС) как одна из наиболее перспективных современных реализаций статистического метода восстановления.

Для восстановления PWV авторами использовалась схема ИНС прямого распространения с 10 нейронами в скрытом слое с передаточной функцией *tanh* (Рис. 1).

В качестве входов ИНС или предикторов использовались данные TDR Base (L1A) SSMIS F16-F18 каналов 1—18 и высота рельефа с флагом типа поверхности. Всего 20 входов. Выход у ИНС единственный — значение PWV. Для обучения ИНС использовались данные реанализа ECMWF Era 5 за 2020 год. Реанализ Era5 был использован как наиболее современный реанализ ECMWF, имеющий временное разрешение 1 час и пространственное разрешение 0,25°×0,25°, которое соответствует спутниковому разрешению [35]. Выполнялось точное пространственное совмещение между спутниковыми данными и данными реанализа и совмещение по времени в пределах ±15 мин. Размер обучающей выборки составил

| Ch. No. | Center Frequency (GHz) | Pass Band (MHz) | Polarization | NE?† (K) |
|---------|------------------------|-----------------|--------------|----------|
| 1 | 50.3 | 400 | H | 0.4 |
| 2 | 52.8 | 400 | H | 0.4 |
| 3 | 53.596 | 400 | H | 0.4 |
| 4 | 54.4 | 400 | H | 0.4 |
| 5 | 55.5 | 400 | H | 0.4 |
| 6 | 57.29 | 350 | * | 0.5 |
| 7 | 59.4 | 250 | * | 0.6 |
| 8 | 150.0 | 1500 | H | 0.88 |
| 9 | 183.31±6.6 | 2500 | H | 1.2 |
| 10 | 183.31±3 | 100 | H | 1.0 |
| 11 | 183.31±1 | 500 | H | 1.25 |
| 12 | 19.35 | 400 | H | 0.7 |
| 13 | 19.35 | 400 | V | 0.7 |
| 14 | 22.235 | 400 | V | 0.7 |
| 15 | 37.0 | 1500 | H | 0.5 |
| 16 | 37.0 | 1500 | V | 0.5 |
| 17 | 91.655 | 3000 | V | 0.9 |
| 18 | 91.655 | 3000 | H | 0.9 |

+

- Высота поверхности
- Флаг типа поверхности

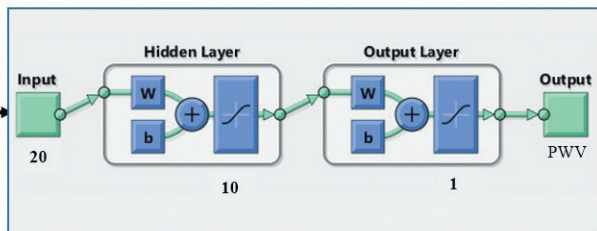


Рис. 1. Схема нейросетевого алгоритма восстановления PWV по данным SSMIS.

Fig. 1 Scheme of a neural network algorithm for PWV recovery from SSMIS data.

5 млн. точек. Для тестирования сети использовались 3 млн. точек измерений SSMIS, совмещённых с данными Era 5. Данные, входящие в выборки, были отобраны в течение 2020 года случайно, но с равномерным распределением географически и по времени. Реанализ Era5 усваивает данные об интегральном паросодержании атмосферы, полученные с микроволновых спутниковых радиометров: AMSR-2, AMSRE, GMI, SSM/I, SSMIS, TMI (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Observations>).

По результатам тестирования точность (среднеквадратичная невязка с данными реанализа) восстановления PWV предложенным нейросетевым алгоритмом над всеми типами поверхности составила 2,4 мм (рис. 2 *а*), а над сушей — около 3 мм (рис. 2 *б*).

Вопрос возникновения высоких значений PWV над сушей заслуживает особого рассмотрения. В рамках настоящей статьи, главная цель которой — описание общей концепции предлагаемого подхода, остановимся на нем лишь кратко.

Рис. 3 иллюстрирует пространственное распределение высоких значений PWV по данным реанализа Era5 (из выборки, использованной для обучения

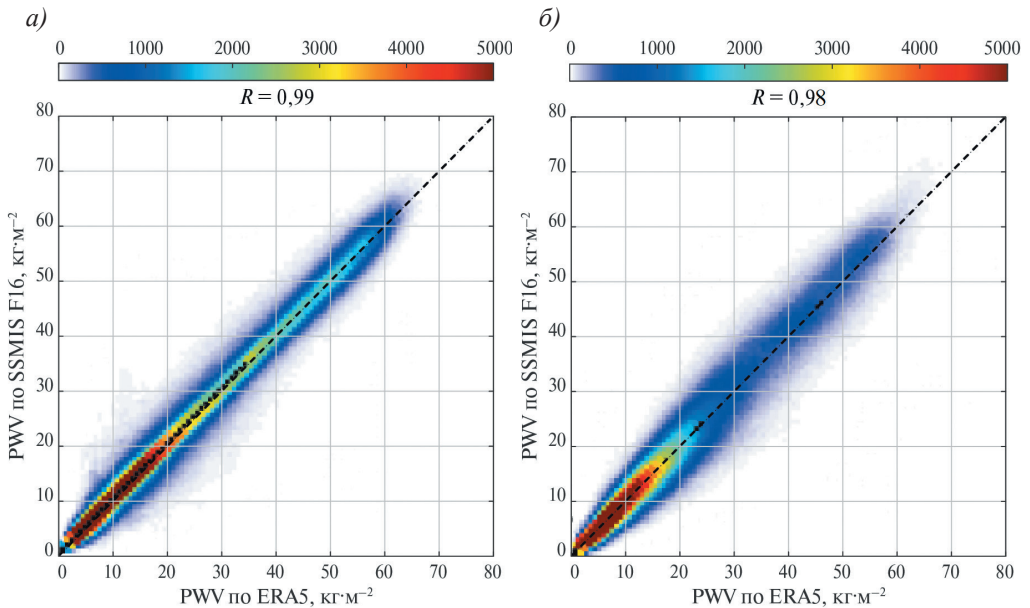


Рис. 2. Скаттерограмма значений интегрального влагосодержания атмосферы, восстановленных по данным SSMIS F16 (вертикальная шкала), и по данным реанализа Era5 (горизонтальная шкала): *а*) над всем Земным шаром, *б*) над сушей; цветом обозначено число пар соответствующих значений (цветовая шкала — сверху).

Fig. 2. Scatter diagram of precipitable water vapor values retrieved from SSMIS F16 data (vertical axis) and according to Era5 reanalysis (horizontal axis): *a*) over the entire globe, *b*) over land; dot color indicates the number of pairs of corresponding values (color scale — above).

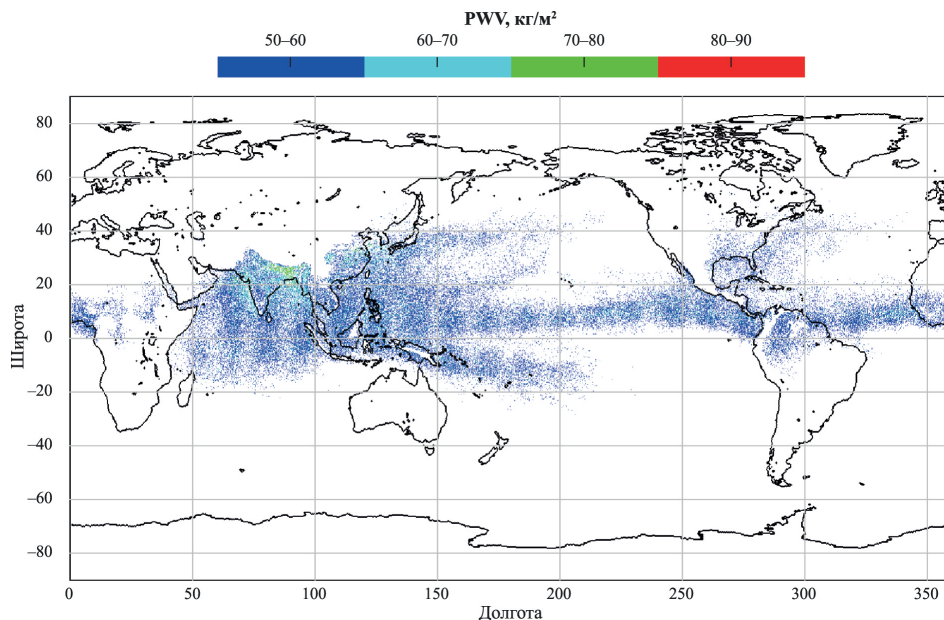


Рис. 3. Географическое распределение высоких значений интегрального влагосодержания по данным реанализа Era5, использованным при обучении нейросети.

Fig. 3. Geographical distribution of high PWV values by Era5 reanalysis data used to perform neural network learning.

нейросети). Нетрудно увидеть, что экстремальные оценки PWV в основном сосредоточены в зоне внутритропической конвергенции (ВЗК) над Мировым океаном, особенно в западной части Тихого океана.

Из рис. 3 также видно, что области высоких значений PWV над сушей географически соответствуют областям ВЗК (Центральная Америка, Африка), зоне влияния сильных муссонов (Индия и предгорья Гималаев), зонам формирования мощных атмосферных рек и тропических циклонов (Юго-восточная Азия, территории вокруг Мексиканского залива).

Восстановление вертикально-интегрированного горизонтального потока водяного пара по данным спутникового радиотепловидения

Общие замечания

Принципиальная возможность восстановления вертикально-интегрированных горизонтальных потоков водяного пара по данным спутникового радиотепловидения показана в работе [36]. Суть методики состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального влагосодержания, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных

требованиях (непрерывности, гладкости). Эта скорость и принимается за эффективную скорость $\vec{u}_{\text{эф}}$, связывающую интегрированный по высоте горизонтальный поток влаги \vec{F}_a с интегральным влагосодержанием Q простым соотношением $\vec{F}_a = Q\vec{u}_{\text{эф}}$. В такой постановке задача расчета \vec{F}_a при известных в последовательные моменты времени полях Q сводится к расчету смещений элементов этих полей, имевших место на интервалах времени между наблюдениями, т.е. к расчету такого поля смещений, которое описывает переход поля Q_1 в более ранний момент времени наблюдений к новому полю Q_2 в следующий момент времени, отстоящий от предыдущего на известный интервал Δt . Делением этого расстояния на время получаем оценку u .

Реализующие такой подход алгоритмы в системах технического зрения получили название «анализа оптического потока». Одновременное восстановление полей интегрального влагосодержания атмосферы и эффективной (взвешенной по высоте) скорости горизонтального переноса водяного пара обеспечивает расчет интегрированных по высоте горизонтальных потоков водяного пара [37]. Эффективность подхода была продемонстрирована путем его применения к анализу различных процессов в системе «океан-атмосфера»: тропических циклонов [38, 39], атмосферных рек [40], глобальной атмосферной циркуляции водяного пара [41]. Сложность перехода к атмосферным процессам над сушей состоит в том, что в этом случае существенно (в разы) ниже оценки интегрального влагосодержания и скорости адвекции, в связи с чем требования к точности оценок (соотношению сигнал/шум) значительно возрастают. Это, в частности, приводит к необходимости более тщательного выбора и реализации метода анализа оптического потока.

Сравнение методов анализа оптического потока

В современных компьютерных системах и системах обработки изображений часто возникает задача отслеживания перемещения объектов и оценки соответствующей скорости перемещения в трех- или двухмерном пространстве. Для решения такой задачи существует множество подходов, и один из них — использование алгоритмов анализа оптического потока. Оптический поток — это «воспринимаемое» движение объектов, поверхностей или краев сцены, возникающее как в результате перемещения проекции объекта на плоскость изображения, так и смещения наблюдателя относительно сцены. Суть анализа оптического потока состоит в установлении соответствия между каждой точкой исходного изображения и некоторой точкой последующего изображения, в которую переместилась первая точка за интервал времени между изображениями. В работе [42] оптический поток определяется как векторное поле, где каждый вектор показывает перемещение отдельной точки между двумя последующими изображениями, «кадрами».

Библиотека алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library, библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом) [43] предлагает реализацию нескольких популярных и наиболее производительных алгоритмов, к которым относятся алгоритм Лукаса-Канаде и алгоритм Фарнебака.

Метод Лукаса-Канаде основан на приближении функции яркости через разложение Тейлора до первого члена [44] и относительно хорошо работает для небольших перемещений, используя многоуровневую обработку для регистрации больших объектов. В библиотеке OpenCV метод реализован как «разреженный» (sparse), что подразумевает вычисление значений векторов перемещения не на каждой точке раstra, а на выбранных (рекомендуется использование специальной функции для выбора «хороших») точках. К преимуществам данного метода можно отнести: формализованные средства выбора точек для отслеживания; автоматическую селекцию корректных результатов; отслеживание малых и больших перемещений (многомасштабность). Недостатки метода Лукаса-Канаде связаны с невозможностью расчетов на гладких участках изображений, не содержащих особенностей, подходящих под критерии выбора точек, и, как следствие, большое количество пустых участков или нулевых значений оптического потока в таких областях.

Алгоритм Фарнебака, предложенный в [45], в отличие от алгоритма Лукаса-Канаде, использует квадратичную форму разложения с целью повышения точности и также реализован в многомасштабной модели. В библиотеке OpenCV метод реализован как плотный (dense), что означает вычисление значений векторов перемещения на каждой точке раstra. Преимущества данного алгоритма заключаются в вычислении плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения), лучших (чем в методе Лукаса-Канаде) результатов для небольшого и среднего перемещений. К недостаткам этого алгоритма относятся появление артефактов при больших смещениях, когда наблюдаемое изменение интерпретируется как «растворение» объекта и возможна некорректная интерпретация малоконтрастных участков как неподвижных, даже если движение их краёв корректно определено.

Необходимо особо выделить алгоритм DIS (Dense Inverse Search), предложенный в работе [46]. В нем также применяется многомасштабный подход, но вместо независимого расчёта на каждой итерации алгоритма вычисления оптического потока рассчитывается промежуточное плотное поле перемещений, что повышает сглаженность и уменьшает количество фрагментов на более крупных масштабах, повышая производительность. На каждом масштабном уровне используется дополнительная быстрая вариационная корректировка вычисленного потока. Критерием коррекции выступает мера энергии, состоящая из взвешенной суммы компонент, первая из которых отвечает за точность соответствия, а вторая — за гладкость поля перемещений. Применяется также ряд дополнительных полуэмпирических критериев оценивания качества итогового оптического потока.

Преимуществами комбинированного метода DIS для нашей задачи являются вычисление плотного оптического потока (в каждой точке исходного изображения), вариационная корректировка с критерием гладкости, уменьшающая число и величину «выбросов», что обеспечивает более высокую итоговую точность, возможность анализа большого диапазона масштабов смещений за счет субпиксельной интерполяции для малых масштабов и анализа пирамиды изображений (пространственного сглаживания), сравнительно высокая скорость обработки,

что позволяет эффективно проводить анализ длинных рядов. Следует отметить, что в результатах обработки по данному алгоритму также присутствуют, хотя и в меньших количествах, чем в других рассмотренных алгоритмах, ошибочные нулевые значения смещений.

Авторами было проведено сравнение горизонтальных потоков водяного пара, восстановленных по спутниковому радиотепловидению (СРТВ), включавшему алгоритм DIS, и реанализу ECMWF Era5, которое представлено на рис. 4. Era5 является последним поколением реанализа ECMWF. В нём собраны глобальные поля двумерных и трёхмерных распределений различных геофизических характеристик на регулярной сетке координат с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и временным разрешением 1 час. В частности, зональная компонента потока атмосферного водяного пара представлена в данных Era5 непосредственно в переменной с названием «Vertical integral of eastward water vapour flux»; меридиональная — в переменной «Vertical integral of northward water vapour flux». Доступ к данным реанализа осуществлялся через сервис Copernicus Climate Data Store.

Из рис. 4 *а* видно, что соответствие между потоками СРТВ и реанализа для зональных компонент достаточно высокое, корреляция между ними около 0,7.

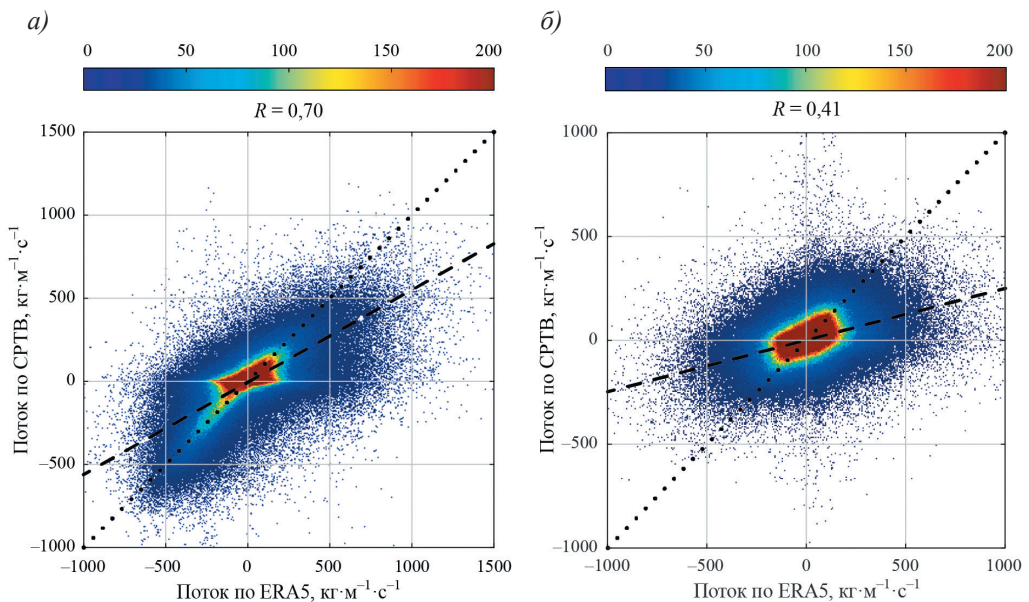


Рис. 4. Сравнение потоков водяного пара, восстановленных по СРТВ и реанализу ECMWF Era5 для: *а*) зональной компоненты, *б*) меридиональной компоненты; цветом обозначено число пар соответствующих значений (цветовая шкала сверху).

Fig. 4. Comparison of water vapor fluxes retrieved from SRTV and ECMWF Era5 reanalysis for: *a*) zonal component, *b*) meridional component; dot color indicates the number of pairs of corresponding values (color scale above).

Для меридиональных компонент потока водяного пара корреляция с реанализом Era5 слабая. Главным образом это вызвано тем обстоятельством, что наиболее активное перемещение водяного пара в атмосфере происходит в зональном направлении в соответствии с общей структурой глобальной атмосферной циркуляции, поэтому зональная компонента движения лучше определяется алгоритмами оптического потока, и для нее соотношение сигнал/шум оказывается гораздо выше. Меридиональный перенос намного слабее и может теряться на фоне шумов и артефактов как спутниковых данных, так и алгоритмов оценки движения. Расхождение оценок по СРТВ и реанализу частично вызвано тем обстоятельством, что применяемые в СРТВ алгоритмы анализа потока в некоторых случаях (например, высокой однородности полей PWV) дают ошибочные нулевые значения, что особенно четко видно на рис. 4 а. Это обстоятельство обсуждено выше. Минимизация этой ошибки — предмет дальнейших исследований авторов в части выбора и совершенствования применяемого алгоритма анализа оптического потока.

На рис. 5 представлено пространственное распределение экстремально высоких потоков водяного пара (выше $500 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$) по данным реанализа Era5, использованным для построения рис. 4. Нетрудно заметить, что географически эти потоки приурочены либо к зоне внутритропической конвергенции, либо к областям частого формирования атмосферных рек [47—53], где такие значения вполне типичны. Эти области в основном относятся к системе «океан-атмосфера» за исключением отдельных случаев, требующих дополнительного анализа. В тоже время мы видим, что довольно большое число оценок горизонтального потока влаги отмечается в умеренных и даже северных широтах над сушей (например,

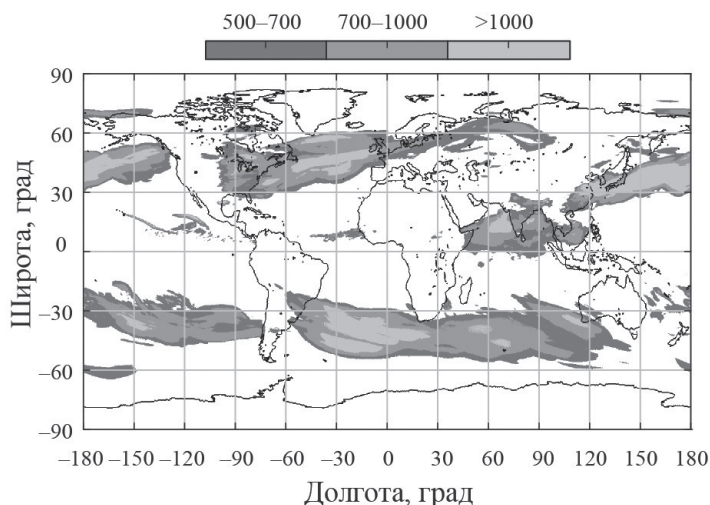


Рис. 5. Географическое распределение высоких значений зональных горизонтальных потоков водяного пара по реанализу ECMWF Era5 в $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$.

Fig. 5. Geographical distribution of high values of horizontal fluxes of water vapor according to Era5 reanalysis в $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$.

в приполярной области ЕТР и Западной Сибири), где эти потоки почти на порядок меньше, поэтому данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Таким образом, в целом предложенная концепция предлагает новую схему анализа водного баланса территорий, замкнутую на данных спутникового микроволнового зондирования Земли. Составляющие эту схему блоки реализованы авторами, их развитие и совершенствование напрямую связаны с актуальными и активно развивающимися в настоящее время задачами ДЗЗ, в частности, задачами улучшения точности восстановления полей атмосферной влажности над сушей и полей атмосферной циркуляции над всеми типами подстилающей поверхности по дистанционным данным.

Заключение

В работе сформулирована общая концепция анализа элементов регионального гидрологического баланса на основе подхода спутникового радиотепловидения. Ее важным достоинством по сравнению к подходам, использующим данные аэрологических измерений, является опора на регулярные, однородные, плотные по пространству и достаточно частые по времени фактические спутниковые наблюдения. В этом смысле такой подход создает важную альтернативу/дополнение подходам на базе численного моделирования климатической системы.

Можно выделить следующие основные шаги алгоритмизации анализа элементов гидрологического баланса по формулам (1—4):

1) расчет общего количества водяного пара ($\sum_s PWV$), содержащегося над заданной областью, в течение рассматриваемого интервала времени;

2) расчет эффективной конвергенции/дивергенции вертикально-интегрированного горизонтального потока водяного пара, прошедшего через внешние контуры области за рассматриваемый интервал времени;

3) решение уравнения водного баланса атмосферы, в котором недостаток/избыток водяного пара в конечный момент времени по сравнению с зарегистрированным ранее обусловлен разностью между выпавшей в виде осадков и испарившейся с данной территории влагой («эффективное увлажнение»).

Эффективность подхода в значительной степени определяется точностью восстановления полей интегрального влагосодержания над сушей и на их основе — полей горизонтального переноса водяного пара. Указанные направления исследований являются актуальными задачами спутникового дистанционного зондирования Земли. В этих направлениях отмечается неуклонный прогресс, связанный как с развитием и выводом на орбиту новых средств наблюдений, так и с совершенствованием методов анализа получаемых данных. Таким образом, следует ожидать, что развиваемый на их базе подход к анализу элементов гидрологического баланса будет приобретать все большую значимость и охватывать все более широкий спектр прикладных и фундаментальных задач.

По мере накопления и обработки данных спутникового радиотеплового мониторинга этот подход будет распространяться как на различные области (бассейны крупных рек; земледельческие районы; другие территории), так и на более

длинные интервалы времени. В настоящее время анализ может быть осуществлен на интервалы времени порядка полутора десятилетий. Это позволит более эффективно и надежно выделять погодно-климатические аномалии и в перспективе давать краткосрочные прогнозы развития региональных и локальных рисков наводнений, засух, пожароопасных ситуаций. В ближайшие планы авторов входит анализ на базе предложенного подхода элементов гидрологического баланса ряда территорий в России (бассейны Оби, Амура, других крупных рек; республика Адыгея, Алтайский край) и за рубежом.

Список литературы

1. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Влияние влагообмена в Северной Атлантике на увлажнение Европейской части России и годовой сток Волги // Водные ресурсы. 2019. Т. 46(3). С. 318—332. DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332.
2. Добровольский С. Г. Климатические изменения в системе «гидросфера–атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 232 с.
3. Добровольский С. Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
4. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: an Overview of the last decade. EEA Technical Report. Copenhagen: European Environment Agency, 2010. 144 p.
5. Kauffeldt A., Wetterhall F., Pappenberger F., Salamon P., Thielen J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level // Environmental Modelling & Software, 2016. V. 75. P. 68—76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>.
6. Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.H., de Roo A. The European flood alert system — part 1: concept and development // Hydrology and Earth System Sciences, 2009. V. 13(2). P. 125—140. DOI: 10.5194/hess-13-125-2009.
7. Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., Gentilini S. The European flood alert system EFAS — Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts // Hydrology and Earth System Sciences, 2009. V. 13(2). P. 141—153. <https://doi.org/10.5194/hess-13-141-2009>.
8. Асмус В. В., Бедрицкий А. И., Стасенко В. Н., Тасенко С. В., Успенский А. Б. Развитие в Росгидромете космической подсистемы наблюдений и системы геофизического мониторинга // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 35—49.
9. Семенов Е. К., Соколина Н. Н., Татаринич Е. В., Тудрий К. О. Синоптические условия формирования катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 25—34.
10. Болгов М. В., Трубецкова М. Д., Филиппова И. А., Харламов М. А. Особенности выпадения экстремальных осадков в бассейне реки Амур летом 2013 г. // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 37—45. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(37-45).
11. Крыжов В. Н., Вильфанд Р. М. Макрометеорологические условия формирования сильных осадков в бассейне р. Амур в июне — сентябре 2013 г. и успешность их прогнозирования / Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации: сб. докл. М.: Росгидромет. 2014. С. 40—53.
12. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2(174). С. 5—14.
13. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМИ, 1994. 154 с.
14. Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 189 с.
15. Малинин В. Н. Влагообмен в системе океан–атмосфера. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. 197 с.
16. Кутуза Б. Г., Данильчев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНАД, 2016. 336 с.
17. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

18. Wentz F. A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102(C4). P. 8703—8718. <https://doi.org/10.1029/96JC01751>.
19. Koike T., Nakamura Y., Kaihotsu I. et al. Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content // *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 48, 217—222, 2004 DOI: <https://doi.org/10.2208/prohe.48.217/>.
20. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1. Proc. SPIE 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II, 852815 (9 November 2012); <https://doi.org/10.1117/12.977774>.
21. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2 // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53(5). P. 2520—2531. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6953129>.
22. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. et al. A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations // *Earth System Science Data*. 2017. V. 9. N. 2. P. 791—808. <https://doi.org/10.5194/essd-9-791-2017>.
23. Divakarla M. G., Barnet C. D., Goldberg M. D. et al. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts // *Journal of Geophysical Research*, 2006. V. 111(D9). D09S15. <https://doi.org/10.1029/2005JD006116>.
24. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВ3А-ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. В.5. Т.1. С. 243—248.
25. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 78—100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
26. Пашинов Е. В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВ3А-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 225—235. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
27. Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А., Выкочко А. В., Кузлякина Ю. А., Черный И. В., Чернявский Г. М. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВ3А-ГЯ со спутника Метеор-М №1 и AMSR-E со спутника Aqua // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. №4. С. 121—128.
28. Крамчанинова Е. К., Успенский А. Б. Определение приповерхностной температуры воздуха над сушей по данным микроволнового зондирования с ИСЗ «Метеор-М» № 1 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. №3. С. 127—136.
29. Сазонов Д. С. Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВ3А ГЯ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. №1. С. 50—64. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64, http://d33.infospace.ru/jr_d33/2022v19n1/50-64.pdf/.
30. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВ3А-ГЯ // *Исследование земли из космоса*. 2022. № 6. С. 101—112. DOI: 10.31857/S0205961422060100/.
31. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А. и др. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВ3А на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 298—303, DOI:10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
32. Hollinger J. P. DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation. Final Report Volume 1. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5000. 1988. 190 p.
33. Ермаков Д. М., Поляков В. Д., Полякова Е. В. Разработка нового алгоритма восстановления интегрального влагосодержания атмосферы над сушей по данным спутникового радиотеплового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 1. С. 31—41. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41.

34. Kunkee D. B., Poe G. A., Boucher, D. J. et al. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008. V. 46, P. 863—883. DOI: 10.1109/tgrs.2008.917980.
35. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. 10.1002/qj.3803.
36. Ermakov D. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications. Springer, Cham, 2021. 199 + XXVII p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
37. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al. Comparison of vertically integrated fluxes of atmospheric water vapor according to satellite radiothermvision, radiosondes, and reanalysis // Remote Sensing, 2021. V. 13, 1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
38. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Role of tropospheric latent heat advective fluxes in the intensification of tropical cyclones // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1254—1265. DOI: 10.1134/S0001433819090172.
39. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Satellite radiothermvision analysis of the evolution of a system of interacting typhoons // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. V. 53. N. 9. P. 945—954. DOI: 10.1134/S0001433817090110.
40. Ермаков Д.М., Чернушич А.П. Развитие автоматических алгоритмов детектирования атмосферных рек / Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018. ИКИ РАН, 2019. С. 68—75.
41. Ermakov D.M. Global circulation of latent heat in the Earth's atmosphere according to data from satellite radiothermvision // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2018, V. 54, N. 9, P. 1223—1243. DOI: 10.1134/S000143381809013X.
42. Форсайт Д., Понж Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М: Издательский дом «Вильямс». 2004. 465 с.
43. Кэлер А., Брэдки Г. Изучаем OpenCV 3 = Learning OpenCV 3. М.: ДМК-Пресс, 2017. 826 с. ISBN 978-5-97060-471-7.
44. Baker S., Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework // International journal of computer vision. Springer, 2004. Vol. 56. P. 221—255.
45. Farnebäck G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion // Image Analysis, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29 — July 2, 2003, Proceedings / ed. Bigün J., Gustavsson T. Springer, 2003. Vol. 2749. P. 363—370.
46. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L. Fast optical flow using dense inverse search / European conference on computer vision. Springer, 2016. P. 471—488.
47. Dettinger M. D., Ralph F. M., Das T. et al. Atmospheric rivers, floods and water resources of California // Water. 2011. V. 3. N. 2. P. 445—478.
48. Gimeno L., Nieto R., Vazquez M., Lavers D.A. Atmospheric rivers: a mini-review // Frontiers in Earth Science. 2014. V. 2. doi: 10.3389/feart.2014.00002.
49. Leung L. R., Qian Y. Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36, N. 3. L03820. doi: 10.1029/2008GL036445.
50. Matrosov S. Y. Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific ocean // Monthly Weather Review. 2013. V. 141. N. 11. P. 3757—3768.
51. Ralph F. M., Dettinger M. D. Storms, floods, and the science of atmospheric rivers // Eos. 2011. V. 92. N. 32. P. 265—272.
52. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific ocean during the winter of 1997/98 // Monthly Weather Review. 2004. V. 132. N. 7. P. 1721—1745.
53. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. et al. Flooding on California's Russian river: Role of atmospheric rivers // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. N. 13. L13801. doi: 10.1029/2006GL026689.

References

1. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Influence of moisture exchange in the North Atlantic on the humidification of the European part of Russia and the annual flow of the Volga. *Vodnyye resursy = Water resources*. 2019;(46):(3):(318—332). (In Russ.). doi: 10.31857/S0321-059646318-332.

2. Dobrovolsky S. G. *Klimaticheskiye izmeneniya v sisteme "gidrosfera–atmosfera" = Climatic changes in the "hydrosphere–atmosphere" system*. Moscow: GEOS. 2002: 232 p. (In Russ.).
3. Dobrovolsky S. G. *Global'nyye izmeneniya rechnogo stoka = Global changes in river runoff*. M.: GEOS. 2011: 660 p. (In Russ.).
4. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: an Overview of the last decade. EEA Technical Report. Copenhagen: European Environment Agency, 2010: 144 p.
5. Kauffeldt A., Wetterhall F., Pappenberger F., Salamon P., Thielen J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environmental Modelling & Software*. 2016;(75):68—76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>.
6. Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.H., de Roo A. The European flood alert system – part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009;(13):(2):125—140. doi: 10.5194/hess-13-125-2009.
7. Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H., Gentilini S. The European flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009;(13):(2):141—153. <https://doi.org/10.5194/hess-13-141-2009>.
8. Asmus V. V., Bedritsky A. I., Stasenko V. N. et al. Development of space observation subsystem and geophysical monitoring system in Roshydromet. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2017;(7):(35—49). (In Russ.).
9. Semenov E. K., Sokolikhina N. N., Tatarinovich E. V., Tudry K. O. Synoptic conditions for the formation of a catastrophic flood on the Amur in 2013. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2014;(8):(25—34). (In Russ.).
10. Bolgov M. V., Trubetskova M. D., Filippova I. A., Kharlamov M. A. Peculiarities of extreme precipitation in the Amur River basin in summer 2013. *Geografiya i prirodnnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2017;(2):(37—45). (In Russ.). doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(37-45).
11. Kryzhov V. N., Vilfand R. M. Macrometeorological conditions for the formation of heavy precipitation in the basin of the river. Amur in June–September 2013 and the success of their forecasting. *Ekstremal'nyye pavadki v bassejny r. Amur: prichiny, prognozy, rekomendatsii: sb. dokl. M.: Rosgidromet = Extreme floods in the basin of the river. Amur: causes, forecasts, recommendations: Sat. report Moscow: Roshydromet*. 2014:(40—53). (In Russ.).
12. Makhinov A. N., Kim V. I., Voronov B. A. Flooding in the Amur basin in 2013: causes and consequences. *Vestnik DVO RAN = Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(2):(174):(5—14). (In Russ.).
13. Malinin V. N. *Problema prognoza urovnya Kaspiyskogo morya = The problem of forecasting the level of the Caspian Sea*. St. Petersburg: RGGMI. 1994: 154 p. (In Russ.)
14. Smirnov N. P., Malinin V. N. *Vodnyy balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha. The water balance of the atmosphere as a hydrological problem*. L.: Izd-vo LSU, 1986: 189 p. (In Russ.)
15. Malinin V. N. *Vlagoobmen v sisteme okean–atmosfera = Moisture exchange in the ocean–atmosphere system*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994: 197 p. (In Russ.)
16. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I. *Sputnikovyy monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti = Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface*. M.: LENANAD, 2016: 336 p. (In Russ.)
17. Sharkov E. A. *Radioteplovoye distantsionnoye zondirovaniye Zemli: fizicheskiye osnovy = Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations: in 2 volumes*. V. 1. M.: IKI RAN, 2014: 544 p. (In Russ.)
18. Wentz F. A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager. *Journal of Geophysical Research*. 1997;(102):(C4):8703—8718. <https://doi.org/10.1029/96JC01751>.
19. Koike T., Nakamura Y., Kaihotsu I., et al. Development of an Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 2004;(48):217—222. doi: <https://doi.org/10.2208/prohe.48.217/>.
20. Imaoka K., Maeda T., Kachi M. et al. Status of AMSR2 instrument on GCOM-W1. *Proc. SPIE 8528, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II*, 2012; (852815):(9 November). <https://doi.org/10.1117/12.977774>.
21. Du J., Kimball J. S., Jones L. A. Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2. *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing*. 2015;(53):(5):2520—2531. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=6953129>.
22. Du J., Kimball J. S., Jones L. A., et al. A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations. *Earth System Science Data*. 2017;(9):(2):791—808. <https://doi.org/10.5194/essd-9-791-2017>.
 23. Divakarla M. G., Barnet C. D., Goldberg M. D., et al. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. *Journal of Geophysical Research*, 2006;(111):(D9):(D09S15). <https://doi.org/10.1029/2005JD006116>.
 24. Boldyrev V. V., Gorobets N. N., Ilgasov P. A. et al. Satellite microwave scanner/probe MTVZA-GYa. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2008;(5):(1):(243—248). (In Russ.).
 25. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., et al. Microwave sounding of the ocean, atmosphere and land cover according to the data of the Meteor-M satellite No. 2. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;(15):(4):(78—100). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
 26. Pashinov E. V. Reconstruction of the integral steam content of the atmosphere according to the data of the MTVZA-GYa instrument (Meteor-M No. 2) over the ocean surface. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;(15):(4):(225—235). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
 27. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Gurvich I. A. et al. Part of the Pacific Ocean according to the MTVZA-GYa microwave radiometers from the Meteor-M No. 1 satellite and AMSR-E from the Aqua satellite. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2012; (9):(4):(121—128). (In Russ.).
 28. Kramchaninova E. K., Uspensky A. B. Determination of near-surface air temperature over land based on data of microwave sounding from satellite “Meteor-M” No. 1. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2012; (9):(3):(127—136). (In Russ.).
 29. Sazonov D. S. Algorithm for retrieval of ocean surface temperature, near-water wind speed and integral steam content from MTVZA GN data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2022;(19):(1):(50—64). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64, http://d33.infospace.ru/jr_d33/2022v19n1/50-64.pdf/.
 30. Sadovskiy I. N., Sazonov D. S. Georeferencing of data from remote radiometric measurements MTVZA-GYa. *Issledovanie zemli iz kosmosa = Earth exploration from space*. 2022; (6):(101—112). (In Russ.). doi: 10.31857/S0205961422060100/.
 31. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Mazurov A. A., et al. The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2021;(18):(4):(298—303). (In Russ.). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
 32. Hollinger J. P. DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation. Final Report Volume 1. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375-5000. 1988: 190 p.
 33. Ermakov D. M., Polyakov V. D., Polyakova E. V. Development of a new algorithm for reconstructing the integral moisture content of the atmosphere over land based on satellite radiothermal monitoring data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2020; (17):(1):(31—41). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-31-41.
 34. Kunkel D. B., Poe G. A., Boucher, D. J. et al. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008; (46):863—883. doi: 10.1109/tgrs.2008.917980.
 35. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. 10.1002/qj.3803.
 36. Ermakov D. Satellite radiothermography of atmospheric processes: method and applications. Springer, Cham, 2021. 199 + XXVII p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.

37. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E. et al. Comparison of vertically integrated fluxes of atmospheric water vapor according to satellite radiothermvision, radiosondes, and reanalysis. *Remote Sensing*, 2021; (13):1639. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
38. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Role of tropospheric latent heat advective fluxes in the intensification of tropical cyclones // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019; (55):(9):(1254—1265). DOI: 10.1134/S0001433819090172.
39. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P. Satellite radiothermvision analysis of the evolution of a system of interacting typhoons. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017; (53):(9):(945—954). doi: 10.1134/S0001433817090110.
40. Ermakov D. M., Chernushich A. P. Development of automatic algorithms for detecting atmospheric rivers. *Informatsionnyye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli = Information technologies in remote sensing of the Earth - RORSE 2018*. IKI RAS, 2019:68—75. (In Russ.).
41. Ermakov D. M. Global circulation of latent heat in the Earth's atmosphere according to data from satellite radiothermvision. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018; (54):(9):(1223—1243). doi: 10.1134/S000143381809013X.
42. Forsyth D., Ponge J. *Komp'yuternoye zreniye. Sovremennyy podkhod = Computer vision. Modern approach* - M: Williams Publishing House. 2004: 465 p. (In Russ.).
43. Kaler A., Bradsky G. *Learning OpenCV 3 = Learning OpenCV 3*. - M.: DMK-Press, 2017: 826 p. — ISBN 978-5-97060-471-7. (In Russ.).
44. Baker S., Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework // *International journal of computer vision*. Springer, 2004; (56):221—255.
45. Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. *Image Analysis, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003, Halmstad, Sweden, June 29 - July 2, 2003, Proceedings* / ed. Bigün J., Gustavsson T. Springer, 2003; (2749):363—370.
46. Kroeger T., Timofte R., Dai D., Van Gool L. Fast optical flow using dense inverse search. *European conference on computer vision*. Springer, 2016:471—488.
47. Dettinger M.D., Ralph F.M., Das T. et al. Atmospheric rivers, floods and water resources of California. *Water*. 2011; (3): 445—478.
48. Gimeno L., Nieto R., Vazquez M., Lavers D.A. Atmospheric rivers: a mini-review. *Frontiers in Earth Science*. 2014; (2). doi: 10.3389/feart.2014.00002.
49. Leung L.R., Qian Y. Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model. *Geophysical Research Letters*. 2009; (36):(3). L03820. doi: 10.1029/2008GL036445.
50. Matrosov S.Y. Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific ocean. *Monthly Weather Review*. 2013; (141):(11): 3757—3768.
51. Ralph F. M., Dettinger M. D. Storms, floods, and the science of atmospheric rivers. *Eos*. 2011; (92):(32):265—272.
52. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific ocean during the winter of 1997/98. *Monthly Weather Review*. 2004;(132):(7):1721—1745.
53. Ralph F. M., Neiman P. J., Wick G. A. et al. Flooding on California's Russian river: Role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*. 2006;(33):(13.) L13801. doi: 10.1029/2006GL026689.

Сведения об авторах

Дмитрий Михайлович Ермаков, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, Институт космических исследований РАН; ведущий научный сотрудник, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, dima@ire.rssi.ru.

Евгений Владимирович Пашинов, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, pashinove@mail.ru.

Алексей Владимирович Кузьмин, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт космических исследований РАН, Alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru.

Сергей Александрович Втюрин, ведущий программист, Институт космических исследований РАН, vturinsa@gmail.com.

Андрей Петрович Чернушич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, andrey@fireras.su.

Information about authors

Dmitry Mikhailovich Ermakov, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), head of department, Space Research Institute of RAS; leading scientist, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, dima@ire.rssi.ru.

Evgeny Vladimirovich Pashinov, Ph.D. (Physics and Mathematics), scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, pashinove@mail.ru.

Alexey Vladimirovich Kuzmin, Ph.D. (Physics and Mathematics), leading scientist, Head of Laboratory, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru.

Sergey Alexandrovich Vtyurin, lead programmer, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, vturinsa@gmail.com.

Andrey Petrovich Chernushich, PhD (Physics and Mathematics), leading scientist, head of laboratory, Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, andrey@fireras.su.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 29.05.2023

Принята к печати после доработки 15.08.2023

The article was received on 29.05.2023

The article was accepted after revision on 15.08.2023