

Предсказание наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Возможно ли это?

В. В. Стерлядкин¹, Д. М. Ермаков^{2,3}, А. В. Кузьмин², Е. В. Пашинов²

¹ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия
E-mail: sterlyadkin@mail.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mails: pldime@gmail.com, alexeyvladkuzmin@mail.ru, pashinove@mail.ru

³ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия

Выпадение обильных осадков над районами водосбора больших рек приводит к сильным наводнениям, которые создают серьёзные угрозы населению и инфраструктуре, наносят существенный социально-экономический ущерб и затрудняют хозяйственную деятельность на прилегающих территориях. В настоящей работе на базе нового метода спутникового радиотепловидения, который позволяет на основе анализа восстанавливаемой динамики полей интегрального влагосодержания (*англ.* precipitable water vapor — PWV) рассчитывать потоки водяного пара над океанами, оценена точность восстановления полей PWV над сушей в районе водосбора р. Амур. Проведённые оценки позволяют рассчитать баланс атмосферной воды над выделенной территорией: запасённого над поверхностью водяного пара, количество воды, вошедшей или вышедшей через границы водосбора, и определить количество выпавших осадков за любой выбранный интервал времени. Относительная погрешность таких измерений зависит не только от погрешностей измерения водяного пара и точности методов радиотепловидения при восстановлении поля горизонтальных потоков атмосферной влаги, но и от размеров речного бассейна, интенсивности и продолжительности осадков. Так, для территории, составляющей 20 % от бассейна Амура, при среднем количестве выпавших осадков 60 мм в течение 10 дней относительная погрешность предложенного радиометрического метода измерения осадков, по нашим оценкам, составит около 22 %. При прохождении циклонов в средних широтах интенсивность и объём выпавших осадков нередко существенно превышают использованные оценки, что повышает точность предложенного метода и целесообразность его применения. Предложены способы проверки точности разработанного метода сравнением с данными наземных радиозондовых измерений, наземных метеостанций, измеряющих количество выпавших осадков, и данными наземных метеорологических радиолокаторов. Проведённый анализ показывает, что определение количества выпавших осадков над территорией бассейна крупных рек, основанное на многоканальных радиометрических микроволновых измерениях из космоса, вполне возможно.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг осадков, прогноз наводнений, бассейн Амура, анализ водного бюджета, интегральное влагосодержание атмосферы, PWV

Одобрена к печати: 19.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-40-52

Введение

Наводнения на реках — опасное явление, предсказание которого позволяет спасти жизни людей и уменьшать ущерб. Большинство наводнений на реках с большим водосбором связано с затяжными дождями, поэтому мониторинг выпадающих жидких осадков может позволить предсказывать наводнения и уменьшать человеческие и материальные потери. Контролировать осадки можно наземными радиолокаторами, однако далеко не все регионы покрыты радиолокационными сетями. Цель настоящей работы — оценка возможностей измерения бюджета атмосферной воды над выделенным регионом земного шара за определённый интервал времени на основе данных многоканальных радиометров, расположенных на метеорологических спутниках. Оценки мы проведём на примере р. Амур, которая имеет

большую площадь водосбора и нередко испытывает серьёзные наводнения. Вторым вопросом, возникающим при такой постановке задачи, — хватит ли существующей точности радиометрических измерений для достижения разумного решения. Третий вопрос — как проверить точность предложенных спутниковых радиометрических методов измерения бюджета атмосферной воды над заданным регионом. В настоящей публикации мы постараемся ответить на поставленные вопросы. Очевидно, что для предсказания наводнений потребуется анализ корреляционных связей между количеством выпавших осадков над тем или иным регионом бассейна и уровнем или расходом воды в различных точках течения реки. Эта гидрологическая задача выходит за рамки настоящей работы и будет выполняться при условии положительного решения задачи спутниковых измерений осадков над заданным регионом.

Основанием для постановки задачи выступают известные методы измерения полей интегрального паросодержания $PWV(x, y, t)$ (*англ.* precipitable water vapor) над сушей, которые обновляются с интервалом, соответствующим периоду пролёта спутников (Deeter, 2007; Du et al., 2017; Zhang et al., 2018). Вторым базовым элементом решения задачи служат новые методы радиотепловидения, разработанные в Институте космических исследований РАН Д. М. Ермаковым с коллегами (Ермаков и др., 2013, 2021; Ermakov, 2021). Радиотепловидение позволяет восстанавливать полное поле $PWV(x, y, t_i)$ без лакун, а затем при сравнении двух близких по времени изображений (по аналогии с методами анализа оптического потока) рассчитывать среднее векторное поле $\mathbf{U}(x, y, t_i - t_{i-1})$ смещения поля водяного пара $PWV(x, y, t_i)$ между i -м и $(i - 1)$ -м спутниковыми кадрами. Разработанная методика позволяет определить среднее векторное поле плотности потока вертикально интегрированного водяного пара $\mathbf{Q}(x, y, t_i - t_{i-1})$ между i -м и $(i - 1)$ -м спутниковыми кадрами и вычислить горизонтальный перенос атмосферной влаги (адвекцию) через любое выделенное сечение на поверхности Земли (Ермаков et al., 2021). Последним этапом является расчёт количества атмосферной воды, вошедшей (или вышедшей) через границу L выделенной площади S над поверхностью Земли за время $t_i - t_{i-1}$ и за произвольный интервал времени $t_2 - t_1$. Достоинством предложенного метода представляется тот факт, что эти вычисления радиометрически замкнуты, т.е. они не требуют привлечения сторонней информации из других источников, отличных от спутниковых радиометров. Важен и тот факт, что предлагаемый метод можно применить для данных российских спутниковых радиометров МТВЗА-ГЯ (Микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)), установленных на космических аппаратах серии «Метеор-М», и китайских радиометров MWRI (*англ.* Microwave Radiometer Imager), установленных на метеорологических спутниках серии Hai Yang (Пашинов, 2018).

Уравнение баланса атмосферной воды над выделенным регионом

Очевидно, что наводнения на крупных реках, как правило, связаны с интенсивными затяжными осадками, выпадающими над водосбором S за промежуток времени $t_2 - t_1$, составляющий 7–30 дней. Именно такой характер имеют наводнения на р. Амур — основным объектом наших исследований (Болгов и др., 2017; Гарцман, 2008; Крыжов, Вильфанд, 2014; Махинов и др., 2014; Семенов и др., 2014). Уравнение баланса атмосферной влаги для выделенного региона можно представить в следующем виде:

$$\text{Prev}(S, t_2 - t_1) = \sum_S \text{TPW}(x, y, t_2) - \sum_S \text{TPW}(x, y, t_1) + \text{Infl}(S, t_2 - t_1), \quad (1)$$

где $\text{Prev}(S, t_2 - t_1)$ (*англ.* precipitation/evaporation) — количество осадков, выпавших на площади S , или количество воды, испарившейся с этой площади, за интервал времени $t_2 - t_1$; $\sum_S \text{TPW}(x, y, t_i)$ (TPW — *англ.* total precipitable water) — полное количество атмосферной воды, находящейся в атмосфере над поверхностью S в начале и конце интервала $t_2 - t_1$, которая включает как жидкую воду, находящуюся в облаках и осадках, так и водяной пар, способный сконденсироваться и дать осадки; $\text{Infl}(S, t_2 - t_1)$ (*англ.* inflow) — количество атмосферной

воды, вошедшей/вышедшей через границу L выделенной площади S за интервал времени $t_2 - t_1$; все слагаемые в уравнении (1) имеют размерность килограмм.

В уравнении баланса (1) учитывается как вклад водяного пара, так и жидкой воды, обусловленный их запасом в облаках и осадках. Однако полное количество атмосферной воды, приходящейся на единицу площади земной поверхности, можно представить как сумму двух слагаемых: $TPW(x, y, t) = PWV(x, y, t) + LWP(x, y, t)$, где $PWV(x, y, t)$ — водяной пар, который присутствует в столбе атмосферы; $LWP(x, y, t)$ (*англ.* liquid water path) — приведённый (интегрированный по высоте) запас жидкой воды, содержащейся в облаках и осадках. Затяжные дожди, с которыми обычно связаны наводнения, формируются слоисто-дождевыми, слоисто-кучевыми или высококучевыми осадками. Мощные кучевые облака и грозы носят локальный и кратковременный характер, поэтому на средние по пространству и времени величины выпавших осадков грозы почти не влияют. В работе (Болгов и др., 2017) показано, что «суммы осадков за периоды менее 10 суток в 2013 г. не были экстремальными с точки зрения интенсивности» и для оценки максимально возможных наводнений на Амуре «целесообразно рассматривать не отдельные ливни короткой продолжительности, а синоптические ситуации с длительным выпадением осадков». По данным радиолокационных исследований известно, что приведённый водозапас слоисто-дождевых или высококучевых облаков не превышает $0,5 \text{ кг/м}^2$. Это значение в летнее время составляет $1/60$ часть от осаждённого водяного пара (Абшаев и др., 2009), поэтому на первом этапе расчётов жидкокапельную воду можно не учитывать и вместо $TPW(x, y, t)$ использовать $PWV(x, y, t)$. Аналогичная ситуация с количеством атмосферной воды, вошедшей/вышедшей через границу L : при его расчёте можно не учитывать перенос жидкой воды, поскольку этот вклад также составляет малую часть от переносимого водяного пара, которая меньше погрешностей его измерения. Таким образом, мы будем анализировать уравнение баланса в виде:

$$\text{Prev}(S, t_2 - t_1) = \sum_S PWV(x, y, t_2) - \sum_S PWV(x, y, t_1) + \text{Infl}(S, t_2 - t_1). \quad (2)$$

Задача настоящей работы — оценка погрешностей расчёта выпадающих осадков $\text{Prev}(S, t_2 - t_1)$ с учётом существующего уровня точности радиометрических измерений полей интегрального водяного пара $PWV(x, y, t)$ и точности расчёта переноса атмосферной воды через границу выделенного региона $\text{Infl}(S, t_2 - t_1)$.

Постановка задачи

Входная информация: известны долговременные ряды полей осаждённого водяного пара $PWV(x, y, t_i)$ над сушей, которые обновляются в момент пролёта спутников t_i . Периодичность обновления — не менее двух раз в сутки. Погрешность определения $PWV(x, y, t_i)$ в единичном пикселе составляет $\Delta PWV(x, y, t_i)$.

Необходимо рассчитать $\text{Prev}(S, t_2 - t_1)$ — количество осадков, выпавших на площади S водосбора некоторой реки, или количество воды, испарившейся с этой площади за интервал времени $t_2 - t_1$, и погрешности таких расчётов $\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1)$.

На *рис. 1а* показана некоторая площадь водосбора реки S , ограниченная замкнутой границей L . Вектор \mathbf{n} — единичный вектор нормали к границе; вектор $\mathbf{Q}(x, y, t_i - t_{i-1})$ — средняя плотность потока осаждённого водяного пара между i -м и $(i-1)$ -м спутниковыми кадрами. Для упрощения оценочных расчётов мы аппроксимируем площадку водосбора квадратом со стороной A , масштаб которого для Амура примем равным $A = 500 \text{ км}$ (*рис. 1б*). Заметим, что водосбор Амура на уровне Хабаровска составляет $1\,630\,000 \text{ км}^2$ (Лисина и др., 2020; Kalugin, Motovilov, 2018), поэтому деление на шесть различных площадей примерно по $250\,000 \text{ км}^2$ даст для одной площадки размеры $500 \times 500 \text{ км}$. Также будем предполагать, что основной перенос влаги происходит вдоль оси x слева направо, при этом за счёт осадков выходящие через правую границу квадрата потоки составляют часть $K_1 < 1$ от потоков, входящих через левую границу: $(Q_x)_{\text{right}} = K_1 (Q_x)_{\text{left}}$. Именно разницей между входящим и выходящим потоками обусловлены осадки над площадью водосбора S . Значение коэффициента K_1 мы оценим

ниже, после введения остальных параметров задачи. Предложенная модель переноса вполне соответствует муссонному характеру атмосферного переноса в бассейне Амура в летний период. Преимущественный характер переноса влаги вдоль оси X мы учтём предположением, что повсюду y -компонента потоков составляет K_2 часть от x -компоненты: $Q_y = K_2(Q_x)_{left}$, где для оценок примем $K_2 = 0,2$. Отметим, что замена площади водосбора квадратом и введение коэффициентов K_1 и K_2 носят условный характер, эти коэффициенты не будут использоваться при решении реальных задач, но их применение к модели позволит нам оценить точность измерений осадков и получить связь погрешности измерений с размерами водосбора, интенсивностью и продолжительностью дождей.

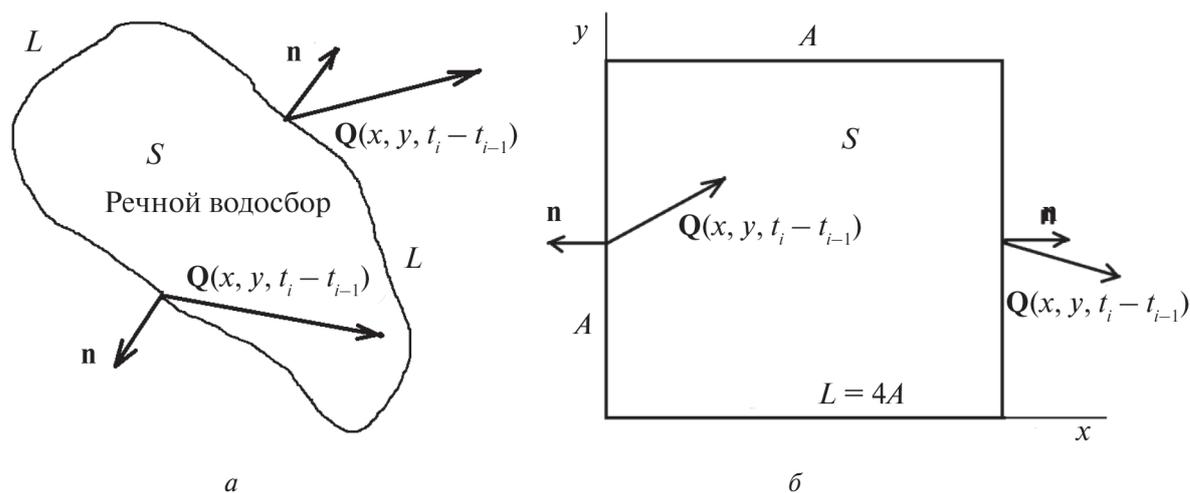


Рис. 1. Аппроксимация площади водосбора квадратом со стороной A

Осадки, выпавшие в бассейне р. Амур с апреля по октябрь 2013 г.

Метеостанция или город	Сумма осадков с апреля по октябрь, мм	Количество осадков с апреля по октябрь по нормам СП 131.13330.2012, мм	Отношение	Суточный максимум осадков, мм	
				по нормам СП 131.13330.2012	по данным наблюдений
1. Могоча	452,7	402	1,126	99	36,1
2. Усть-Нюкжа	640,3	408	1,570	128	56
3. Сковородино	622,4	401	1,552	97	64
4. Черняево	859,5	455	1,890	86	66
5. Зея	698,7	495	1,410	75	61
6. Шимановск	778,2	496	1,565	78	91
7. Свободный	909,5	578	1,574	89	85
8. Белогорск	815,9	481	1,696	105	102
8. Благовещенск	747	514	1,453	122	70
10. Архара	807,4	577	1,400	104	84
11. Облучье	812,9	687	1,183	113	41
12. Биробиджан	653,6	746	0,876	–	41
13. Хабаровск	571,6	585	0,977	121	40
14. Троицкое	636,6	549	1,160	78	39
15. Комсомольск-на-Амуре	531,3	484	1,098	95	46
16. Николаевск-на-Амуре	408,9	433	0,944	82	28

Оценим значение коэффициента K_1 исходя из инструментальных данных об осадках в бассейне р. Амур, полученных наземными плювиографами (http://portal.esimo.ru/data-view/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2655). В *таблице* приведены данные, полученные в экстремально дождливый сезон 2013 г. Максимальные суточные значения выпавших осадков достигают 80–110 мм/сут. По данным различных исследователей установлено, что наводнения на Амуре не связаны с интенсивными ливнями, а, как правило, обусловлены затяжными дождями от 10 до 50 дней (Болгов и др., 2017; Семенов и др., 2014). Для оценок мы предположим, что в период затяжных дождей в течение 10 дней выпадает 60 мм осадков, т. е. средняя интенсивность дождя составляет $I = 0,25$ мм/ч. Это значение соответствует интенсивности моросящего дождя. Очевидно, что реальные осадки не могут равномерно идти в течение 10 дней на всей поверхности водосбора, а носят неравномерный характер как во времени, так и в пространстве. Однако среднее значение 60 мм считается весьма умеренным. Подтверждением служит среднемесячное количество осадков, например, в Хабаровске в июле 2006 г. составившее более 150 мм (http://portal.esimo.ru/data-view/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2655).

Учитывая преимущественный перенос слева направо, для проведения оценок примем, что средние значения проекций скорости переноса по осям составляют $U_x = 8$ м/с, $U_y = 2$ м/с, а погрешности определения этих проекций, измеряемые методами оптического потока, — 20 %. То есть $\sigma_{U_x} = 1,6$ м/с, $\sigma_{U_y} = 0,4$ м/с. Время переноса влажного воздуха на расстояние $A = 500$ км через площадь водосбора составит $\tau = A/U_x = 17$ ч. За это время выпадет $I\tau = 4,25$ мм осадков. В летний период интенсивных осадков вертикально интегрированный водяной пар имеет масштаб $PWV_{av} = 30$ кг/м², что эквивалентно слою осаждаемой воды в 30 мм. В результате получим, что при прохождении влажного воздуха над водосбором выпало $4,25$ мм/30 мм = 0,14 от входящей влаги. Это эквивалентно $K_1 = 0,86$.

Другой, альтернативный, способ оценки средней интенсивности затяжных осадков (и коэффициента K_1) может быть основан на измерении расхода R воды в некотором сечении вдоль русла реки. Если данному сечению реки соответствует площадь водосбора S , то можно оценить, при какой средней интенсивности осадков сформируется такой поток воды. Для этого введём коэффициент D , описывающий долю осадков, попавших в русло реки. Для Амура характерно насыщение почвы влагой, так что можно принять $D = 0,75$. В этом случае среднюю за относительно длинный период времени интенсивность осадков I можно связать с расходом:

$$R \text{ м}^3/\text{с} = DI \text{ мм/ч} \cdot \frac{10^{-3} \text{ м/мм}}{3600 \text{ с/ч}} \cdot S \text{ м}^2.$$

В створе Хабаровска в период наводнений расход имеет масштаб, примерно в 10 раз превышающий среднегодовой расход, что составляет $R = 1,4 \cdot 10^5$ м³/с; водосбор выше Хабаровска составляет площадь $S = 1,6 \cdot 10^{12}$ м² (Лисина и др., 2020). Отсюда получаем усреднённую по водосбору и по времени интенсивность затяжных осадков $I = 0,42$ мм/ч. В соответствии с описанной выше методикой это значение даст $K_1 < 0,86$, что обеспечит более высокую относительную точность микроволновых измерений осадков. Однако мы ограничимся значением $K_1 = 0,86$.

Оценка абсолютной и относительной погрешности определения количества выпавших осадков над водосбором

На первом этапе оценим величины и погрешности вычисления полного количества атмосферной воды, находящейся в атмосфере над поверхностью S в начале и в конце интервала накопления $t_2 - t_1$, которые в уравнении (2) расположены под знаками суммы. Для этого введём параметр b — характерный размер одного пикселя при радиометрических измерениях $PWV(x, y, t_i)$ над сушей. Для метеорологической ситуации, которая сопряжена с большими осадками, примем среднее по площади S значение $PWV_{av} = 30$ кг/м². Заметим, что, по дан-

ным работ (Пашинов, Ермаков, 2021; Du et al., 2017), средняя погрешность ΔPWV радиометрических измерений осаждённого водяного пара составляет над океаном около 2 кг/м^2 , а над сушей погрешность возрастает до $\Delta PWV = 3 \text{ кг/м}^2$. Характерный размер одного пикселя b , для которого погрешности измерений можно считать статистически независимыми, примем $b = 50 \text{ км}$, равным разрешению на самом длинноволновом канале при радиометрических измерениях со спутника (Hollinger et al., 1990). С учётом площади водосбора $S = A^2 = 500 \text{ км}^2$ полное вертикально интегрированное количество осаждённого водяного пара в момент времени t рассчитаем по формуле:

$$\sum_S PWV(x, y, t) = PWV_{av} S = PWV_{av} N_1 b^2 = 7,5 \cdot 10^{12} \text{ кг}, \quad (3)$$

где $N_1 = (A/b)^2 = 100$ — количество статистически независимых слагаемых. Среднеквадратичная погрешность измерения вертикально интегрированного количества осаждённого водяного пара $\Delta \sum_S PWV$ определяется как погрешность суммы N_1 независимых слагаемых, которая равна погрешности одного слагаемого $\Delta PWV_{av} b^2$, умноженной на корень из числа слагаемых:

$$\Delta \sum_S PWV = \sqrt{N_1} \cdot \Delta PWV_{av} b^2 = 7,5 \cdot 10^{10} \text{ кг}.$$

Второй шаг связан с оценками третьего слагаемого в соотношении (2) $\text{Infl}(S, t_2 - t_1)$, описывающего поток воды, вошедший в замкнутый контур L , и ошибки его определения $\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$. Для проведения такой оценки необходимо разделить контур L на статистически независимые участки. Метод радиотепловидения (анализ оптического потока) позволяет рассчитывать среднее векторное поле скорости $U(x, y, t_i - t_{i-1})$ смещения поля водяного пара $PWV(x, y, t_i)$ между i -м и $(i-1)$ -м спутниковыми кадрами. Методика поиска смещения поля $PWV(x, y, t_i)$ между i -м и $(i-1)$ -м спутниковыми кадрами опирается на сравнение изображений на иерархии площадок, переходя от крупных участков к более мелким. Статистически независимыми измерениями в данном методе можно считать площадки размером 4×4 пикселей, т. е. $a \times a = 100 \times 100 \text{ км}$. Векторное поле плотности потока вертикально интегрированного водяного пара $Q(x, y, t_i - t_{i-1})$ между i -м и $(i-1)$ -м спутниковыми кадрами через границу выделенной площади определяется произведением:

$$Q(x, y, t_i - t_{i-1}) = PWV(x, y, t_i) U(x, y, t_i - t_{i-1}). \quad (3)$$

На каждом независимом элементе границы погрешность определения величины $Q(x, y, t_i - t_{i-1})$ для каждой из проекций можно выразить соотношением:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_x &= \left[(PWV_{av} \Delta U_x)^2 + (\Delta PWV_{av} U_x)^2 \right]^{0,5}, \\ \Delta Q_y &= \left[(PWV_{av} \Delta U_y)^2 + (\Delta PWV_{av} U_y)^2 \right]^{0,5}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На левой границе получим оценки $(Q_x)_{left} = 240 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $(\Delta Q_x)_{left} = 54 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. На правой границе эти величины умножаются на $K_1 = 0,86$: $(Q_x)_{right} = K_1 (Q_x)_{left} = 206 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и $(\Delta Q_x)_{right} = K_1 (\Delta Q_x)_{left} = 46 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. И на всех границах водосбора оценка для y -компоненты имеет масштаб $(Q_y) = K_2 (Q_x)_{left} = 48 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $(\Delta Q_y) = K_2 (\Delta Q_x)_{left} = 11 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Для наших входных значений относительная погрешность определения потоков на любой из границ:

$$\frac{(\Delta Q_x)_{left}}{(Q_x)_{left}} = \frac{54}{240} = 22,5 \%$$

Количество воды, вошедшей на площадь водосбора за промежуток времени $t_i - t_{i-1}$ между кадрами, определяется конвергенцией вектора Q через границу L , умноженной на интервал времени $t_i - t_{i-1}$:

$$\text{Infl}(S, t_i - t_{i-1}) = (t_i - t_{i-1}) \oint_L Q(x, y, t_i - t_{i-1}) \mathbf{n} \, dl, \quad (5)$$

где под интегралом записано скалярное произведение векторов \mathbf{Q} и \mathbf{n} — единичного вектора нормали к границе L . Полное количество воды, вошедшей на водосбор за длительный интервал времени $t_2 - t_1$, будет простой суммой:

$$\text{Infl}(S, t_2 - t_1) = \sum_{t_1}^{t_2} \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1}). \quad (6)$$

Оценим численно эту величину на площади $A \times A$, принимая типичное время продолжительности затяжных осадков $t_2 - t_1 = 10$ сут. Для этого необходимо учесть средние значения плотности потоков на каждой из границ выделенной области $(Q_x)_{right} = K_1(Q_x)_{left}$, $Q_y = K_2(Q_x)_{left}$, где мы оценили $K_1 = 0,86$ и $K_2 = 0,2$. При этом плотность потоков будет иметь следующие значения: $(Q_x)_{left} = \text{PWV}(x, y, t_i)U_x = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \times 8 \text{ м/с} = 240 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $(Q_x)_{right} = 206 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $Q_y = 48 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Для квадратной площади размером $A \times A$, представленной на *рис. 1б*, и отрезка времени $t_2 - t_1$ между двумя соседними кадрами имеем:

$$\begin{aligned} \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1}) &= (t_i - t_{i-1}) \oint_L \mathbf{Q}(x, y, t_i - t_{i-1}) \mathbf{n} \, dl = \\ &= (t_i - t_{i-1}) \left[\int_{left} (Q_x)_{left} \, dl - \int_{top} (Q_y)_{top} \, dl + \int_{bottom} (Q_y)_{bottom} \, dl - \int_{right} (Q_x)_{right} \, dl \right] = \\ &= (t_i - t_{i-1}) \cdot (Q_x)_{left} A(1 - K_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Принимая во внимание преимущественный перенос слева направо при оценке общего количества воды, вошедшей на водосбор за половину суток, суммарный вклад через верхнюю и нижнюю границы можно не учитывать. (Заметим, что такое предположение можно делать только для оценки $\text{Infl}(S, t_i - t_{i-1})$, но никак не при вычислениях погрешности этой величины $\Delta \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1})$.) Если принять предложенные оценочные значения $(t_i - t_{i-1}) = 12 \text{ ч} = 3600 \text{ с} = 4,32 \cdot 10^4 \text{ с}$; $(Q_x)_{left} = 240 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$; $A = 500 \text{ км} = 5 \cdot 10^5 \text{ м}$; $K_1 = 0,86$, то получим: $\text{Infl}(S, t_i - t_{i-1}) = 7,2 \cdot 10^{11} \text{ кг}$.

Если средний приход влажного воздуха продолжается $t_i - t_{i-1} = 10$ сут, то количество воды, вошедшей на водосбор за это время, увеличится в $M = (t_2 - t_1)/(t_i - t_{i-1}) - 1 = 19$ раз и составит величину: $\text{Infl}(S, t_2 - t_1) = 1,37 \cdot 10^{13} \text{ кг}$.

Чтобы определить погрешность полученной величины, необходимо учесть, что суммарный поток воды, входящий внутрь водосбора S , равен сумме потоков, входящих и выходящих через участки границы, которые мы разделили по статистически независимым погрешностям на участки, линейный размер которых a составляет 4 пикселя, или $a = 100 \text{ км}$.

Погрешность вычисления потока входящей воды для одного независимого элемента на левой границе водосбора за время между двумя кадрами составит:

$$\Delta \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1})_0 = (t_i - t_{i-1}) a (\Delta Q_x)_{left} = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ кг}. \quad (8)$$

На всей левой границе погрешность вычисления потока складывается из $N = A/a = 5$ независимых слагаемых, которые дополнительно складываются во времени $M = (t_2 - t_1)/(t_i - t_{i-1}) - 1 = 19$ раз. В результате:

$$\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)_{left} = \Delta \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1})_0 \sqrt{NM} = 2,2 \cdot 10^{12} \text{ кг}. \quad (9)$$

На правой границе погрешность вычисления потока входящей воды будет в K_1 раз меньше, а на верхней и нижней границах квадрата погрешности уменьшатся в K_2 раз. Общая погрешность потока входящей воды $\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$ через полную границу L складывается как сумма независимых величин на всех четырёх сторонах квадратной границы, и мы получим:

$$\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1) = \Delta \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1})_0 \sqrt{NM} \cdot \sqrt{1 + K_1^2 + 2K_2^2} = 3,0 \cdot 10^{12} \text{ кг}. \quad (10)$$

Относительная погрешность измерения полного количества воды, вошедшей на водосбор за интервал времени $t_2 - t_1 = 10$ сут, имеет значение:

$$\frac{\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)}{\text{Infl}(S, t_2 - t_1)} = \frac{\Delta \text{Infl}(S, t_i - t_{i-1})_0 \sqrt{NM} \cdot \sqrt{1 + K_1^2 + 2K_2^2}}{(t_i - t_{i-1}) \cdot (Q_x)_{\text{left}} Na(1 - K_1)M} = \frac{(\Delta Q_x)_{\text{left}} \sqrt{1 + K_1^2 + 2K_2^2}}{(Q_x)_{\text{left}} (1 - K_1) \sqrt{NM}} = 22 \%. \quad (11)$$

Теперь на основе формулы (2) можно рассчитать полную среднеквадратичную погрешность вычисления количества выпавших осадков:

$$\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1) = \left[2 \left(\Delta \sum \text{PWV} \right)^2 + \Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)^2 \right]^{0,5} = 3,0 \cdot 10^{12} \text{ кг}. \quad (12)$$

Сравнивая отношения (12) и (10), нетрудно заметить, что $\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1) \approx \Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$, поскольку вклад погрешностей, связанных с суммарным водяным паром над водосбором в начале и конце интервала накопления, много меньше погрешностей расчёта вошедшей на водосбор воды. Относительная погрешность при оценке выпавших осадков имеет вид:

$$\frac{\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1)}{\text{Prev}(S, t_2 - t_1)} = \frac{\left[2 \left(\Delta \sum \text{PWV} \right)^2 + \Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)^2 \right]^{0,5}}{\text{Infl}(S, t_2 - t_1)} = \frac{3,1 \cdot 10^{12} \text{ кг}}{1,44 \cdot 10^{13} \text{ кг}} = 22 \%. \quad (13)$$

При этом при расчёте $\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1)$ мы учли, что первые два слагаемых в формуле (1) почти компенсируют друг друга, т. е. интегральное содержание водяного пара над водосбором за искомый интервал изменяется много меньше, чем вошедшее на территорию водосбора за 10 сут количество водяного пара.

Интерес представляет характер зависимости относительной погрешности в аналитическом виде, который можно представить на основании уравнений (2)–(13). Во-первых, в формуле (13) вклад погрешности определения осадённого водяного пара $\Delta \sum \text{PWV}$ в начале и конце интервала времени почти в 60 раз меньше, чем вклад $\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$ — погрешности расчёта вошедшего на территорию водяного пара. Поэтому $\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1) \approx \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$ можно заменить на $\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$. Во-вторых, $\text{Prev}(S, t_2 - t_1) \approx \text{Infl}(S, t_2 - t_1)$. Поэтому выражение (13) можно привести к более простому виду:

$$\frac{\Delta \text{Prev}(S, t_2 - t_1)}{\text{Prev}(S, t_2 - t_1)} \approx \frac{\Delta \text{Infl}(S, t_2 - t_1)}{\text{Infl}(S, t_2 - t_1)} = \frac{(\Delta Q_x)_{\text{left}} \sqrt{1 + K_1^2 + 2K_2^2}}{(Q_x)_{\text{left}} (1 - K_1) \sqrt{NM}}. \quad (14)$$

где величина $\sqrt{1 + K_1^2 + 2K_2^2} \approx \sqrt{1 + 0,86^2 + 2 \times 0,2^2} = 1,35$ учитывает преимущественный характер переноса водяного пара. Параметр K_1 взят равным 0,86 и характеризует долю водяного пара, который прошёл, не конденсуясь, через весь водосбор. Чем ближе K_1 к единице, тем слабее интенсивность осадков и меньшая доля водяного пара выпадает в виде дождя. Параметр K_2 принципиальной роли не играет и характеризует ослабление переноса в направлении, перпендикулярном преимущественному движению. При этом для любого интервала времени между последовательными пролётами спутника всегда найдётся преимущественное направление переноса. Величина $N = A/a$ равна отношению характерного размера границы водосбора к масштабу, a — элементу разрешения в методе радиотепловидения. Параметр M пропорционален длительности интегрирования осадков и соответствует количеству спутниковых кадров минус единица. Из соотношения (14) видно, что чем меньше относительная погрешность измерения вектора переноса водяного пара $(\Delta Q_x)/(Q_x)$, чем больше средняя интенсивность осадков $(1 - K_1)$ и чем больше и дольше их длительность, тем выше точность определения полного количества осадков, выпавших над водосбором. Следовательно, над малыми реками с небольшим водосбором применение рассмотренного метода будет проблематичным. Ухудшение точности можно ожидать при кратковременных осадках, а также в случае осадков малой интенсивности. Река Амур выступает оптимальным объектом как с точки зрения площади водосбора, так и по наличию затяжных осадков. Поэтому Амур выбран тестовым объектом для наших расчётов.

Возможные методы проверки точности определения осадков, выпавших над заданным регионом

Наиболее прямым независимым методом измерения количества осадков, выпавших над заданным регионом за заданный интервал времени, представляется получение данных наземных метеорологических радиолокаторов. Метеорологические радары регистрируют поле радиолокационной отражаемости, по которой с достаточно высокой точностью определяют интенсивность выпадающих осадков (Степаненко, 1966). Учитывая высокую частоту обновления данных на метеорологических радиолокаторах, интенсивность текущих осадков легко пересчитывается в интегральное суточное количество выпавших осадков. Однако бассейн Амура не покрыт радиолокационной сетью. По федеральной программе к 2020 г. в бассейне Амура должно быть установлено шесть метеолокаторов, однако, по данным (Болелов, 2018), в 2018 г. был установлен только один в Комсомольске-на-Амуре. На июль 2022 г. в открытом доступе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) нам не удалось найти радиолокационные данные восточнее Екатеринбурга, так что проверка метода с помощью метеорологических радиолокаторов над территорией Амура пока недоступна. Тем не менее сравнение радиометрического метода, описанного в настоящей работе, с данными радиолокационных измерений осадков можно провести не обязательно над бассейном той или иной реки. Можно это сделать и над европейской территорией России, где радиолокационной сетью контролируется большая её часть. Для этого нужно будет выбрать интервал времени с длительными осадками над обширной территорией.

Одним из способов проверки работоспособности и точности предложенного микроволнового метода измерений выпавших осадков может служить сравнение с данными реанализа. Сопоставление позволит не только оценить погрешности сравниваемых методов, но и корректировать методику предложенного метода измерений. При этом следует учитывать, что методика реанализа основана на усвоении данных от всех доступных источников метеорологической информации, включая данные радиозондирования и информацию от наземных метеостанций. Поскольку водосбор Амура имеет редкую сеть наблюдений, то данные реанализа будут опираться в основном на спутниковые измерения, что несколько снизит их точность в этом регионе.

Использование спутниковой информации об осадках, получаемой по различию рассеяния на разных длинах волн, по-видимому, не может служить тестом для предложенного метода, поскольку в этом случае измерение осадков проводится только в момент пролёта спутника, а высокая пространственная и временная нестабильность осадков не позволяет проводить необходимое усреднение.

Возможен вариант сравнения разработанного радиометрического метода с данными, получаемыми на наземных метеостанциях с помощью пювигрографов. Недостатком такого подхода остаётся та же проблема, связанная с тем, что редкую сеть пювигрографов трудно аппроксимировать на весь регион из-за той же изменчивости осадков в пространстве.

Другой вид контроля и проверки предложенного метода может быть направлен на сравнение всех расчётных параметров, которые должны измеряться радиометрически с аналогичными измерениями наземными или космическими средствами. Например, следует проверить точность восстановления полей вертикально интегрированного водяного пара $PWV(x, y, t)$ над сушей и среднюю плотность потока водяного пара между i -м и $(i-1)$ -м спутниковыми кадрами $Q(x, y, t_i - t_{i-1})$ сравнением радиометрических данных с данными пунктов радиозондирования, которые совмещены по координатам и по времени со спутниковыми измерениями.

Заключение

Таким образом, проведённый анализ показывает, что определение количества выпавших осадков над территорией бассейна крупных рек, основанное на многоканальных радиометрических микроволновых измерениях из космоса, вполне возможно. Относительная погрешность таких измерений зависит не только от погрешностей измерения водяного пара и точности методов радиотепловидения при восстановлении поля горизонтальных потоков атмосферной влаги, но и от размеров речного бассейна, интенсивности и продолжительности осадков. Так, для территории, составляющей 20 % от бассейна Амура, при среднем количестве выпавших осадков 60 мм в течение 10 дней относительная погрешность предложенного радиометрического метода измерения осадков, по нашим оценкам, составит около 22 %. В умеренных широтах нередко наблюдаются такие явления, как прохождение внетропических циклонов, пассатный перенос, атмосферные реки, сопровождающиеся интенсивными осадками, масштаб которых зачастую существенно превышает использованные оценки. Это повышает точность предложенного метода и целесообразность его применения.

Предложены способы проверки точности разработанного метода путём сравнения с данными реанализа, наземных радиозондовых измерений, наземных метеостанций, измеряющих количество выпавших осадков, и данными наземных метеорологических радиолокаторов.

Реализация методов радиотепловидения и предложенного радиометрического метода измерения бюджета атмосферной влаги над бассейном выбранной реки позволит подойти к решению актуальной задачи раннего предупреждения крупных наводнений. Несомненным достоинством предложенного метода представляется его радиометрическая замкнутость, т.е. отсутствие необходимости привлечения данных других источников информации, кроме данных многоволновых спутниковых радиометров. Это особенно важно для районов со слабой наземной метеорологической инфраструктурой.

Работа выполнена в рамках тем «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) и «Космос-2» (госрегистрация № 075-01133-22-00).

Литература

1. *Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М., Мизиева Ж. Ю.* Радиолокационные исследования водосодержания кучево-дождевых облаков // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 782–788. <https://naukarus.com/radiolokatsionnye-issledovaniya-vodosoderzhaniya-kuchevo-dozhdevyh-oblakov>.
2. *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).
3. *Болелов Э. А.* Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Науч. вестн. Московского гос. техн. ун-та гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 5. С. 117–129. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129>.
4. *Гарцман Б. И.* Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
5. *Ермаков Д. М., Зражевский А. Ю., Чернушич А. П.* Автоматический анализ радиоизображений для систем радиовидения: моделирование и численный эксперимент // Журн. радиоэлектроники: электрон. журн. 2013. № 7. 16 с. <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/2/text.pdf>.
6. *Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А., Пашинов Е. В., Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Стерлядкин В. В., Чернушич А. П., Черный И. В., Стрельцов А. М., Шарков Е. А., Екимов Н. С.* 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.
7. *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.

8. Лисина И. А., Василевская Л. Н., Василевский Д. Н., Подвербная Е. Н., Агеева С. В. Анализ гидрологического режима и связей летне-осеннего стока нижнего Амура с циркуляционными индексами // Географ. вестн. 2020. № 3(54). С. 98–112. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-98-112.
9. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2014. № 2(174). С. 5–14.
10. Пашинов Е. В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-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.
11. Пашинов Е. В., Ермаков Д. М. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы над сушей по данным SSMIS // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–10 нояб. 2021. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 187. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
12. Семенов Е. К., Соколихина 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.
13. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 350 с.
14. Deeter M. N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. Iss. 2. Art. No. L02815. 5 p. DOI: 10.3103/S1068373914080032.
15. Du J., Jones L. A., Kimball J. S. Daily Global Land Surface Parameters Derived from AMSR-E and AMSR2. Version 2 (NSIDC-0451) / NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive. Boulder, 2017.
16. Ermakov D. Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications. Ser.: Springer Praxis Books. Cham: Springer, 2021. 199 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
17. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E., Sterlyadkin V., Chernushich A., Sharkov E. Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermvision, Radiosondes, and Reanalysis // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 1639. 15 p. <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
18. Hollinger J. P., Peirce J. L., Poe G. A. SSM/I instrument evaluation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. No. 5. P. 781–790.
19. Kalugin A. S., Motovilov Yu. G. Runoff formation model for the Amur River basin // Water Resources. 2018. V. 45. No. 2. P. 149–159. DOI: 10.1134/S0097807818020082.
20. Zhang Q., Ye J., Zhang S., Han F. Precipitable Water Vapor Retrieval and Analysis by Multiple Data Sources: Ground-Based GNSS, Radio Occultation, Radiosonde, Microwave Satellite, and NWP Reanalysis Data // J. Sensors. 2018. V. 2018. Art. ID 3428303. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2018/3428303>.

Flood prediction on major rivers from radiometric microwave measurements from space. Is it possible?

V. V. Sterlyadkin¹, D. M. Ermakov^{2,3}, A. V. Kuzmin², E. V. Pashinov²

¹ MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
E-mail: sterlyadkin@mail.ru

² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: pldime@gmail.com, alexeyvladkuzmin@mail.ru, pashinove@mail.ru

³ Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia

Heavy rainfall over catchment areas of large rivers leads to severe floods that pose serious threats to the population and infrastructure, cause significant socio-economic damage and hinder economic activities in the surrounding areas. In this work, based on a new method of satellite radiothermal imaging, which allows, based on the analysis of the reconstructed dynamics of precipitable water vapor (PWV) fields, calculating water vapor fluxes over the oceans, the accuracy of reconstructing PWV fields over land in the Amur River catchment area is estimated. The estimates make it possible to calculate the balance of atmospheric water over a selected area: the water vapor stored above the surface, the amount of water that entered or exited through the boundaries of the catchment area, and to determine the

amount of precipitation for any selected time interval. The relative error of such measurements depends not only on the measurement errors of water vapor and the accuracy of radio thermal imaging methods in restoring the field of horizontal flows of atmospheric moisture, but also on the size of the river basin, the intensity and duration of precipitation. For example, for a territory that makes 20 % of the Amur basin with an average amount of precipitation of 60 mm for 10 days, the relative error of the proposed radiometric method for measuring precipitation, according to our estimates, will be about 22 %. Methods are proposed for checking the accuracy of the developed method by comparing it with data from ground-based radiosonde measurements, ground-based meteorological stations that measure the amount of precipitation, and data from ground-based meteorological radars. The analysis performed shows that it is quite possible to determine the amount of precipitation over the territory of the basin of large rivers based on multichannel radiometric microwave measurements from space.

Keywords: satellite monitoring of precipitation, flood forecast, Amur basin, water budget analysis, precipitable water vapor, PWV

Accepted: 19.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-40-52

References

1. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Malkarova A. M., Mizieva Z. Yu., Radar estimation of water content in cumulonimbus clouds, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 731–736, DOI: 10.1134/S0001433809060061.
2. Bolgov M. V., Trubetskova M. D., Filippova I. A., Kharlamov M. A., Characteristics of extreme precipitation events within the amur river basin in summer 2013, *Geography and Natural Resources*, 2017, Vol. 38, No. 2, pp. 139–146, DOI: 10.1134/S1875372817020044.
3. Bolelov E. A., Meteorological service for civil aviation: problems and ways of their solution, *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2018, Vol. 21, No. 5, pp. 117–129 (in Russian), <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129>.
4. Gartsman B. I., *Dozhdevye navodneniya na rekakh yuga Dal'nego Vostoka: metody raschetov, prognozov, otsenok riska* (Rain floods on rivers methods of calculation, forecasts, risk assessments), Vladivostok: Dalnauka, 2008, 223 p. (in Russian).
5. Ermakov D. M., Zrazhevsky A. Yu., Chernushich A. P., Automatic analysis of radio images for radio vision systems: modeling and numerical experiment, *Jurnal Radioelektroniki*, 2013, No. 7, 16 p. (in Russian), <http://jre.cplire.ru/jre/jul13/2/text.pdf>.
6. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Mazurov A. A., Pashinov E. V., Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Sterlyadkin V. V., Chernushich A. P., Cherny I. V., Streltsov A. M., Sharkov E. A., Ekimov N. S., The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on IKI-Monitoring Center for Collective Use Center), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 298–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
7. Kryzhov V. N., Vilfand R. M., Macrometeorological conditions for the formation of heavy precipitation in the Amur River basin in June – September 2013 and the accuracy of its forecast, *Ekstremal'nye pavodki v basseine r. Amur: prichiny, prognozy, rekomendatsii*, Moscow: Roshydromet, 2014, pp. 40–53 (in Russian).
8. Lisina I. A., Vasilevskaya L. N., Vasilevsky D. N., Podverbnaya E. N., Ageeva S. V., The lower Amur River hydrological regime and relations between the summer-autumn runoff and circulation indices, *Geographical Bull.*, 2020, No. 3(54), pp. 98–112 (in Russian), DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-98-112.
9. Makhinov A. N., Kim V. I., Voronov B. A., Floods in the Amur basin in 2013: causes and consequences, *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, No. 2(174), pp. 5–14 (in Russian).
10. Pashinov E. V., Retrieval of integrated water vapor content of the atmosphere over the ocean using MTVZA-GY (Meteor-M No. 2) data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 225–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
11. Pashinov E. V., Ermakov D. M., Reconstruction of the integral steam content of the atmosphere over land according to SSMIS data, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 2021, p. 187 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
12. 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, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, Vol. 39, No. 8, pp. 521–527, DOI: 10.3103/S1068373914080032.
13. Stepanenko V. D., *Radiolokatsiya v meteorologii* (Radar in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 350 p. (in Russian).

14. Deeter M. N., A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, Issue 2, Art. No. L02815, 5 p., DOI: 10.3103/S1068373914080032.
15. Du J., Jones L. A., Kimball J. S., *Daily Global Land Surface Parameters Derived from AMSR-E and AMSR2, Version 2 (NSIDC-0451)*, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive, Boulder, 2017.
16. Ermakov D., *Satellite radiothermvision of atmospheric processes: method and applications*, Ser.: Springer Praxis Books, Cham: Springer, 2021, 199 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57085-9>.
17. Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E., Sterlyadkin V., Chernushich A., Sharkov E., Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermvision, Radiosondes, and Reanalysis, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 1639, <https://doi.org/10.3390/rs13091639>.
18. Hollinger J. P., Peirce J. L., Poe G. A., SSM/I instrument evaluation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1990, Vol. 28, No. 5, pp. 781–790.
19. Kalugin A. S., Motovilov Yu. G., Runoff formation model for the Amur River basin, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, No. 2, pp. 149–159, DOI: 10.1134/S0097807818020082.
20. Zhang Q., Ye J., Zhang S., Han F., Precipitable Water Vapor Retrieval and Analysis by Multiple Data Sources: Ground-Based GNSS, Radio Occultation, Radiosonde, Microwave Satellite, and NWP Reanalysis Data, *J. Sensors*, 2018. Vol. 2018, Art. ID 3428303, 13 p., <https://doi.org/10.1155/2018/3428303>.