Развитие гидрологической обстановки на реках по данным двухчастотного дождевого радиолокатора: первые результаты

В.Ю. Караев¹, М.А. Панфилова¹, Е.М. Мешков¹, Ю.А. Титченко¹, Г.Н. Баландина¹, З.В. Андреева²

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия E-mail: volody@ipfran.ru ²Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» Росгидромета, Москва, Россия

Мониторинг и прогнозирование наводнений являются ключевыми задачами для обеспечения безопасности жизнедеятельности населения. Современные космические средства существенно расширяют возможности наземной гидрологической сети, т.к. позволяют проводить измерения на больших территориях. Японское космическое агентство в 2014 году вывело на орбиту двухчастотный дождевой радиолокатор и, таким образом, у ученых появился новый радиолокационный инструмент изучения Земли. Разработан комплекс программ для обработки и анализа данных дождевого радиолокатора. Впервые проведена обработка измерений дождевого радиолокатора, которые были выполнены над сушей на территории России. В качестве тестового полигона был выбран Хабаровский край, на участке р. Амур от с. Мариинское до устья реки, и исследовалось проявление весеннего половодья 2015 года на радиолокационном изображении в Кu- и Ка-диапазонах. Источником данных контактных измерений был гидрологический пост в с. Мариинское. Было показано, что на радиолокационном изображении прослеживается временная динамика: переход от снежного покрова к весеннему половодью и его завершению. В данном случае существенных отличий данных в Ки- и Ка-диапазонах не наблюдалось. Осложняющим фактором является то, что рельеф на суше приводит к зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) от направления сканирования, и это затрудняет сравнение радиолокационных данных, получаемых на разных витках. Разбиение исследуемой области на участки и накопление информации об измерениях УЭПР под разными углами падения и направлениями сканирования на протяжении года позволит сформировать некий «паспорт» участка, учитывающий сезонность, осадки и т.п., и использовать его при обработке новых данных. Это повысит достоверность интерпретации наблюдаемых эффектов и оперативность получения информации.

Ключевые слова: двухчастотный дождевой радиолокатор, удельная эффективная площадь рассеяния, весеннее половодье, мониторинг гидрологической обстановки на реках

Одобрена к печати: 30.11.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-185-199

Введение

Наводнения являются одним из наиболее распространенных стихийных бедствий, приводящих к большим экономическим потерям и человеческим жертвам. Часто наводнения вызываются продолжительными, интенсивными дождями и ливнями, например, таким было крупное наводнение в бассейне р. Амур летом 2013 года. На реках Северного полушария сильные наводнения могут также происходить весной и быть связаны как с таянием снега, так и с заторами льда на реках. В прибрежных районах при сильных ветрах возможны нагонные наводнения, в частности, широко известно катастрофическое наводнение в Новом Орлеане в 2005 году, вызванное ураганом Катрина. До строительства дамбы от подобных наводнений сильно страдал Санкт-Петербург.

Европа в последние годы также часто подвержена наводнениям, приводящим к значительному материальному ущербу и жертвам среди населения, например, последнее крупное наводнение во Франции в 2016 году, захватившее и Париж.

По данным Росгидромета, наводнениям в Российской Федерации периодически подвержены территории площадью около 500 тыс. км²; наводнениям с катастрофически-

ми последствиями – 150 тыс. км², на которых расположено более 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, более 7 млн. га сельскохозяйственных угодий (Рыбальский и др., 2015).

В большинстве случаев предотвратить или остановить наводнения человек пока не в силах. Поэтому постоянный мониторинг и своевременный прогноз развития наводнений является способом минимизировать неблагоприятные последствия. В Российской Федерации обнаружение и прогнозирование развития неблагоприятных гидрологических стихийных явлений осуществляет Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). По состоянию на 2016 год в составе гидрологической сети Росгидромета на территории Российской Федерации действует 3081 станций и постов, из них 89 гидрологических станций, 2386 речных постов, 322 озерных поста основной сети и 284 гидрологических поста дополнительной сети (Фролов и др., 2016).

Космические снимки являются быстрым и относительно дешевым путем получения оперативной и точной информации о развитии наводнений. Радиометры MODIS со спутников Terra и Aqua позволяют проводить мониторинговые наблюдения наводнений с глобальным пространственным покрытием (разрешение 250–1000 м) и хорошими временными характеристиками (1–2 раза в сутки). Более того, существует архив данных с 2000 года, что позволяет разрабатывать новые алгоритмы, совершенствовать существующие и оценивать их точность (Ward et al., 2013; Brakenridge, Kettler, 2014; Brakenridge, Anderson, 2006).

Активно развиваются алгоритмы, основанные на анализе многоспектральных данных со сверхвысоким пространственным разрешением, которые позволяют провести детальное картографирование затопленных районов (Malinowski et al., 2015). Они предоставляют новые возможности по классификации объектов по сравнению с традиционными оптическими данными.

Ограничивает возможности перечисленных выше методов наличие облачности (Ticehurst et al., 2014), что на территории России во время наводнений является распространенным явлением. В летние месяцы наличие растительности затрудняет обнаружение наводнений в лесных массивах.

В связи с этим самым перспективным инструментом для картографирования наводнений из космоса является радиолокатор с синтезированной апертурой (PCA) (Martinis, Rieke, 2015). Это обусловлено рядом причин, в частности, PCA обеспечивает собственное микроволновое «освещение» изучаемой области. Следовательно, измерения не зависят от погодных условий и времени суток, что гарантирует в случае необходимости непрерывность наблюдений, которую не способны обеспечить рассмотренные выше методы. Более того, PCA обладает уникальной возможностью обнаруживать воду, закрытую растительностью (Martinis, Rieke, 2015; Townsend, 2001).

В настоящее время на орбите функционируют несколько PCA, например, TerraSAR-X, RADARSAT-2, COSMO-SkyMed, данные которых могут использоваться для мониторинга наводнений. Существенным недостатком применительно к российской территории является высокая стоимость снимков (Российская Федерация не имеет собственных орбитальных PCA), что делает невозможным их использование в режиме постоянного мониторинга территории России для своевременного обнаружения наводнений.

Источником «бесплатных» данных являются скаттерометры, однако они обладают низким пространственным разрешением: 25×25 км, что затрудняет обнаружение и мониторинг локальных наводнений.

В связи с этим вывод на орбиту двухчастотного дождевого радиолокатора (Dualfrequency precipitation radar – DPR) с разрешением около 5×5 км открывает потенциальную возможность мониторинга локальных наводнений, и в данной работе обсуждаются первые результаты использования данных дождевого радиолокатора для обнаружения и мониторинга разлива рек на примере весеннего половодья в нижнем течении р. Амур в 2015 году.

Двухчастотный дождевой радиолокатор был разработан Японским космическим агентством (JAXA) и выведен на орбиту в конце февраля 2014 года. Радиолокатор предназначен для измерения высотного профиля осадков с шагом по высоте 250 м в полосе обзора 245 км (Ки-диапазон) и 125 км (Ка-диапазон) (JAXA..., 2014). На *рис. 1* приведена схема измерений. В *табл. 1* приведена информация по спутнику и установленной измерительной аппаратуре.

Последний отсчет по высоте относится к отражению от поверхности Земли, и измеренная удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) содержит информацию о рассеивающей поверхности. В настоящее время эта информация не используется при стандартной обработке в JAXA. В данной работе эти данные будут использоваться для оценки возможности мониторинга наводнений.

орбита	не солнечно-синхронная		
наклонение	65°		
высота орбиты	407 км		
аппаратура	двухчастотный дождевой радиолокатор (DPR) многочастотный СВЧ-радиометр (GMI)		
рабочие частоты DPR	КиРК (13,6 ГГц) КаРК (35,5 ГГц)		
диаграмма направленности DPR	0,71°		
ширина полосы обзора	245 км (KuPR), 125 км (KaPR)		
число лучей	49		
пространственное разрешение	5 км (в надир)		
разрешение по дальности	250 м		
углы зондирования	±17,04° (KuPR) и ±8,52° (KaPR)		

Таблица 1. Основные характеристики спутника GPM (JAXA..., 2014)

Сведения о тестовом полигоне и постановка задачи

Зимний период 2014–2015 годов был первым для двухчастотного дождевого радиолокатора. В качестве примера рассмотрим ситуацию с весенним половодьем в Хабаровском



Рис. 1. Схема измерения (ЈАХА, 2014)

крае в нижнем течении р. Амур весной 2015 года. В работе проводится анализ развития весеннего половодья, т.к. максимальные уровни воды в нижнем течении р. Амур были достигнуты в весенние месяцы, в то время как летние дождевые паводки в 2015 году практически не наблюдались.

Для обработки данных и анализа радиолокационных изображений разработан комплекс программ. Специальный блок визуализации позволяет совмещать радиолокационное изображение и карты.

На *рис. 2* приведена карта исследуемой области (слева) и справа на карту нанесены русла рек и озер. Такая «маска» водоемов будет накладываться на радиолокационное изображение, полученное дождевым радиолокатором, что поможет при анализе радиолокационных изображений. Точками на карте (справа) отмечены центры рассеивающих площадок (5×5 км), наблюдаемых дождевым радиолокатором.

Сложность обеспечения достоверности прогнозов весеннего половодья обусловлена тем, что интенсивность разлива рек зависит от многих параметров, например, запасов воды в снежном покрове к моменту его таяния, интенсивности снеготаяния, степени влажности и глубины промерзания почв водосбора до выпадения первого снега осенью, количества осадков, выпадающих в период таяния снегов.

Воспользуемся данными дождевого радиолокатора, полученными в период с апреля по июль 2015 года для оценки возможности анализа развития гидрологической обстановки в нижнем течении р. Амур.

Объективная информация о развитии весеннего половодья была получена с гидрологического поста, расположенного в с. Мариинское (51,72° с. ш. и 140,17° в.д.). Для нас при анализе будет интересна информация о состоянии снежного покрова, наличии ледяного покрова на реках и озерах, интенсивности осадков, уровне воды и глубине затопления поймы. При средних углах падения суша имеет более высокий коэффициент отражения по сравнению с водной поверхностью, поэтому внутренние водоемы выглядят на радиолокационных снимках более темными участками. В этом диапазоне работают скаттерометры и РСА. При малых углах падения УЭПР водной поверхности выше, поэтому водоемы на радиолокационном изображении выглядят светлыми пятнами. Для примера на *рис. 3* приведен «разрез» по озеру Ильмень (Караев и др., 2015, 2017) в Ки-диапазоне (слева) и в Кадиапазоне (справа).



Рис. 2. Карта исследуемой области. Точками на карте обозначены водоемы: р. Амур и озера



Рис. 3. Пример сечения радиолокационного изображения озера Ильмень в Ки-диапазоне (а) и Ка-диапазоне (б). Открытая вода. Углы падения лежат в интервале 7,20 – 8,30. Звездочки и ромбы соответствуют сечениям под разными углами падения

Переход «суша-вода» хорошо виден по скачку УЭПР. Высота «ступеньки» зависит от угла падения, скорости ветра, влажности почвы и других параметров, например, (Романов, 2002; Миронов и др., 1994).

Таким образом, в работе предполагается рассмотреть динамику изменения радиолокационного изображения полигона в весенний период и оценить возможность обнаружения весеннего половодья и сравнить с данными контактных измерений.

Развитие гидрологической обстановки по наземным данным

До 21 апреля на р. Амур наблюдался сплошной ледяной покров, потом появились закраины. Ледоход начался 1 мая и продолжался три дня. Первые «проталины» в снежном покрове на суше появились 28 апреля, а полностью снег сошел 9 мая.

Временной ход уровня воды на посту приведен на *рис. 4*. Максимальный уровень воды наблюдался 4 мая, когда вода поднялась до отметки 3,87 м. Наводнение (как опасное явление) в данном случае не наблюдалось.



Рис. 4. Временной ход уровня воды на гидрологическом посту с. Мариинское

Повышение уровня воды приводит к выходу реки из берегов, затоплению низменных районов, и на *рис. 5* показана динамика затопления поймы вблизи гидрологического поста с. Мариинское.

Наблюдается хорошая корреляция между уровнем воды и глубиной затопления поймы. Однако надо иметь в виду, что «возвращение» реки в свои берега не означает, что не осталось затопленных участков, которые покрыты водой и «высохнут» позднее. Например, это может быть старое русло реки, небольшие озера, болотистые участки.

В качестве примеров выберем следующие даты: 14.04.2015, 8.05.2015, 14.06.2015 и 30.07.2015. В эти дни радиолокационные изображения (траектории движения спутника) «почти» повторялись, и их можно сравнивать без дополнительной подготовки.



Рис. 5. Временной ход глубины затопления поймы на гидрологическом посту с. Мариинское

Развитие гидрологической обстановки по радиолокационным данным

В середине апреля 2015 года наблюдался устойчивый снежный покров (на посту с. Мариинское высота снежного покрова составляла 0,57 м, 14.04.2015) и отрицательная температура воздуха, водоемы были покрыты льдом. В результате не наблюдается резкого контраста при переходе «вода-суша» по УЭПР, как летом (см. *рис. 3*). На *рис. 6а, б* приведены радиолокационные изображения исследуемой области в Ки- и Ка-диапазонах (14.04.2015). Для удобства сравнения для графиков в Ки- и Ка-диапазонах был выбран одинаковый масштаб: от -12 дБ до 16 дБ.



Рис. 6. Радиолокационное изображение в Ки-диапазоне (а) и в Ка-диапазоне (б) (14.04.2015). Точками на карту нанесена «маска водоемов». Кружком обозначено местоположение гидрологического поста (с. Мариинское)

При нулевом угле падения обратное рассеяние является квазизеркальным, поэтому УЭПР достигает 12–15 дБ. На рисунке нулевой угол падения соответствует линии, проходящей по центру «красной» области, где достигаются максимальные значения УЭПР. Кружком на рисунке отмечено место расположения поста. Выполним разрез радиолокационного изображения, проходящий через гидрологический пост, для фиксированного угла падения (вдоль траектории движения спутника). Направление, вдоль которого выполнялись разрезы, показано на рисунке серой полосой.

В *табл.* 2 приведены углы падения, под которыми наблюдался гидрологический пост в выбранные дни. Небольшое расхождение в углах падения не является критичным для сравнения, т.к. зависимость УЭПР от углов падения для суши не является сильной и не превосходит флуктуации УЭПР, обусловленные амплитудным шумом.

Для сглаживания флуктуаций УЭПР проводилось усреднение по трем углам падения, т.е. к основному разрезу, проходящему через пост, добавлялись два соседних разреза и вычислялось среднее.

дата	угол падения, град.	дата	угол падения, град.
14.04.2015	6,07	13.04.2015	5,30
08.05.2015	6,74	07.05.2015	6,06
14.06.2015	7,58	13.06.2015	4,55
30.07.2015	4,57	29.07.2015	9,09

Таблица 2. Параметры наблюдения

На *рис.* 7 и 8 приведены усредненные таким образом разрезы в Ки- и Ка-диапазонах соответственно для выбранных дней.



Рис. 7. Разрез радиолокационного изображения вдоль направления движения спутника (сохранение угла падения) в Ки-диапазоне. Кривая 1 – снежный покров (14.04.2015), кривая 2 – максимальный наблюдаемый уровень воды в реке (8.05.2015), кривая 3 – спад уровня воды в русле реки (14.06.2015) и кривая 4 – низкий уровень воды (30.07.2015)

Из рисунков видно, что правый «спад» УЭПР (кривые 2–4) не перемещается, а изменяется положение левой стороны. Причиной этого является то, что русло реки петляет. С правой стороны русло резко уходит в сторону, а с левой уход более плавный. Два пика на рисунке соответствуют пересечению разрезом русла реки.

Кривая 4 (ширина пика) отражает «длину» участка, когда разрез идет параллельно руслу реки и частично его захватывает, обеспечивая достаточно высокое значение УЭПР. За его пределами мы наблюдаем отражение от почвы и низкое значение УЭПР. При увеличении уровня воды пойма затопляется и увеличивается область, покрытая водой (кривые 2 и 3). Это ведет к росту УЭПР по сравнению с кривой 4 и расширению пика.



Рис. 8. Разрез радиолокационного изображения вдоль направления движения спутника (сохранение угла падения) в Ка-диапазоне. Кривая 1 – снежный покров (14.04.2015), кривая 2 – максимальный наблюдаемый уровень воды в реке (8.05.2015), кривая 3 – спад уровня воды в русле реки (14.06.2015) и кривая 4 – низкий уровень воды (30.07.2015)

Диаметр элемента разрешения дождевого радиолокатора равен примерно 5 км. Размер водоемов, которые попадают в полосу обзора меньше, т.е. отраженный сигнал приходит как от водной поверхности, так и от суши. Поэтому измеряемое дождевым радиолокатором УЭПР меньше, чем могло бы быть при отражении только от водной поверхности.

Для озера Ильмень (диаметр более 40 км) переход от воды к суше на радиолокационном изображении занимает примерно 3 точки (элемента разрешения). Озеро округлое, и приведенные на *рис. 3* разрезы проходят под прямым углом к береговой линии. В случае р. Амур переход к суше более длинный даже при низких уровнях воды (кривая 4), т.к. разрез реки происходит под углом к руслу реки.

В пойме р. Амур присутствует большое число мелких озер и проток, которые заполняются водой при повышении уровня воды в реке и формируют медленный спад УЭПР с левой стороны (кривые 2, 3). После возвращения реки в свои берега начинается «высыхание» мелких водоемов и происходит «сужение» области, занятой водой (кривая 4).

Как показала обработка, в данном случае не наблюдается сильных различий в радиолокационных изображениях в Ка- и Ки-диапазонах. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы оценить возможности двухчастотной радиолокации для мониторинга наводнений.

В качестве примера приведем разрезы, полученные на день раньше рассмотренных выше, т.е. 13 апреля, 7 мая, 13 июня, 29 июля (см. *табл. 2*). На *рис. 9* линия разреза показана серой полосой. Сами разрезы для Ки-диапазона приведены на *рис. 10*. Три максимума, которые просматриваются на графиках, связаны с «водными» объектами, которые пересекает сечение: два озера и река.



Рис. 9. Радиолокационное изображение в Ки-диапазоне (29.07.2015). Точками на карту нанесена «маска водоемов». Прямая серого цвета показывает линию разреза

При наличии снежного покрова идентифицировать водные объекты проблематично, что видно из *рис. 7, 8, 10*. Во время весеннего половодья уровень воды поднимается во всех водоемах, увеличивается площадь водной поверхности, и это приводит к росту УЭПР и «широким» пикам, связанным с водоемами (кривые 3 и 4).

Пики на рисунках, соответствующие водоемам, станут более «острыми» после того, как крупные водоемы вернутся в свои берега и высохнут мелкие водоемы. В дальнейшем это можно будет использовать для оценки ширины исследуемого водоема вдоль направления разреза.

В завершение приведем оценку влияния на УЭПР соотношения между площадью водной поверхностью S_{eoda} и площадью суши в элементе разрешения дождевого радиолокатора. Предположим, что в формировании отраженного сигнала принимают участие водная поверхность и суша, причем УЭПР водной поверхности σ_{eoda} существенно выше (10 или 6 дБ), чем УЭПР суши σ_{cvua} (-4 дБ). Пусть площадь рассеивающей поверхнос-



Рис. 10. Разрез радиолокационного изображения вдоль направления движения спутника (сохранение угла падения) в Ки-диапазоне. Кривая 1 – снежный покров (13.04.2015), кривая 2 – максимальный наблюдаемый уровень воды в реке (7.05.2015), кривая 3 – спад уровня воды в русле реки (13.06.2015) и кривая 4 – низкий уровень воды (29.07.2015)

ти (пятна) равна S₀, тогда для получения грубой оценки УЭПР можно воспользоваться следующей формулой:

$$\sigma_{0} = \sigma_{\text{soda}} \frac{S_{\text{soda}}}{S_{0}} + \sigma_{\text{grua}} \frac{\left(S_{0} - S_{\text{soda}}\right)}{S_{0}}$$

На *рис. 11* приведено изменение УЭПР в зависимости от процента площади элемента разрешения, покрытого водой, т.е. 100% соответствует водной поверхности. Сплошной кривой показана зависимость для УЭПР водной поверхности 10 дБ, а пунктиром – 6 дБ.



Рис. 11. Зависимость УЭПР от процента площади, покрытой водой

Вполне возможно, что это в дальнейшем позволит ввести новый термин для гидрологии, описывающий соотношение между сушей и водной поверхностью в элементе разрешения.

Заключение

Разработан комплекс программ для обработки и анализа радиолокационных изображений, формируемых двухчастотным дождевым радиолокатором при измерении над сушей. В качестве исследуемого природного явления были выбраны наводнения. В работе рассматривался ход весеннего половодья в нижнем течении р. Амур весной 2015 года. Источником данных контактных измерений стал гидрологический пост в с. Мариинское.

В отличие от морской поверхности, где направление траектории движения спутника не влияет на УЭПР, а важно только направление ветра относительно направления зондирования, для суши направление сканирования дождевого радиолокатора необходимо учитывать при сравнении из-за рельефа. В связи с этим для прямого сравнения без дополнительной обработки можно использовать только близкие по направлению сканирования измерения. Это приводит к значительному уменьшению частоты наблюдения заданного участка, например, выбранный участок попадает в полосу обзора в Ки-диапазоне раз в двое суток, а требование к его наблюдению при заданном направлении сканирования приведет к тому, что повторное наблюдение произойдет через 10–15 суток.

Поэтому на начальном этапе исследования возможности двухчастотного дождевого радиолокатора для изучения гидрологической обстановки на реках были выбраны измерения, соответствующие характерным этапам: 1) до начала наводнения (до весеннего половодья), 2) максимальный уровень воды, 3) снижение уровня воды и 4) низкий уровень воды.

Обработка данных показала, что изменение гидрологической обстановки может быть обнаружено с помощью двухчастотного дождевого радиолокатора, работающего при малых углах падения. Увеличение поверхности, покрытой водой (затопление поймы реки, мелких озер и проток), ведет у росту УЭПР, и этот эффект легко обнаруживается при обработке, что показано в работе.

Необходимо отметить, что размер элемента разрешения дождевого радиолокатора составляет около 5 км, и поэтому в общем случае внутри него будут находиться как водная поверхность, так и суша. В связи с этим небольшое изменение уровня воды в реке не приведет к значительному изменению УЭПР. С другой стороны, при значительном увеличении уровня воды происходит наполнение мелких озер. После завершения наводнения на реке они остаются заполненными водой и продолжают влиять на величину УЭПР, маскируя спад воды в «главном» русле, что и показала обработка данных.

Также важно отметить, что в течение года может происходить значительное изменение коэффициента отражения электромагнитных волн, связанное с изменением характеристик отражающей поверхности в результате изменения влажности почвы, роста растительности, изменения температуры, наличия и высоты снежного покрова, наличия ледяного покрова на водоемах. Для того чтобы корректно учесть влияние всех этих факторов на УЭПР и оперативно обнаруживать наводнения, необходим сбор радиолокационных и контактных данных на протяжении года для создания радиолокационного «портрета» (паспорта) участка, который будет содержать информацию об УЭПР, измеренных под разными углами падения и для разных направлений зондирования в разные сезоны, т.е. будут учитываться факторы, связанные с сезонностью, например, с образованием лиственного покрова лесов. В результате для каждого нового измерения можно будет найти аналогичное наблюдение данного участка и использовать эти данные для анализа и обнаружения наступления наводнения. В этом случае возможное запаздывание обнаружения наводнения не будет превосходить 1–2 суток.

Это задача будет решаться в нашей следующей работе.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-45-02501 р-поволжье-а), данные предоставлены Японским космическим агентством (8th GPM/TRMM RA of the Japan Aerospace Exploration Agency (PI 306)).

Литература

- 1. Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Баландина Г.Н., Андреева З.В. Оценка возможностей двухчастотного дождевого радиолокатора для решения задач диагностики ледяного покрова внутренних водоемов // Тринадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, Москва, 16–20 ноября 2015. Тезисы. С. 268.
- 2. *Караев В., Панфилова М., Титченко Ю., Мешков Е., Баландина Г., Андреева З.*, Первые результаты мони-торинга формирования и разрушения ледяного покрова в зимний период 2014–2015 гг. на оз. Ильмень по данным двухчастотного дождевого радиолокатора // Исследование Земли из космоса, принята к печати и выйдет в N 1-2, 2017.
- 3. *Миронов В.Л., Комаров С.А., Рычкова Н.В., Клещенко В.Н.* Изучение диэлектрических свойств влажных почвогрунтов в СВЧ-диапазоне // Исследование Земли из космоса. 1994. № 4. С. 18–24.
- 4. Романов А.Н. Диэлектрические и радиоизлучательные свойства засоленных почв в микроволновом диапазоне». Барнаул: изд. Алтайского университета, 2002. 118 с.
- Барнаул. над. нананского университета, 2002. 110 с.
 Рыбальский Н.Г., Омельяненко В.А., Думнов А.Д., Самотесов Е.Д., Муравьева Е.В., Мирошниченко Н.А., Борискин Д.А., Кургачёва О.В., Черногаева Г.М., Пугач С.Л., Черепанский М.М., Демин А.П., Волосухин В.А. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2014 году» // М.: НИА-Природа, 2015. 270 с. URL: http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/dad/gosdokl_.pdf.
- 6. Фролов А.В., Яковенко М.Е., Шумаков И.А. Обзор деятельности Федеральной службы по гидрометеороло-
- Фронов А.В., Лювенко М.Е., Шумаюв И.А. Обзор деятельности Федеральной служов по гидрометеороло-гии и мониторингу окружающей среды за 2015 год // М.: ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 2016. 70 с.
 Brakenridge R., Anderson E. MODIS-based flood detection, mapping and measurement: The potential for ope-rational hydrological applications // In: Transboundary Floods: Reducing Risks through Flood Management / J. Marsalek, G. Stancalie, G. Balint (Eds.). Springer Netherlands: Berlin, Germany, 2006. P. 1–12. 8. *Brakenridge G.R., Kettner A.J.* Dartmouth Flood Observatory. URL: http://floodobservatory.colorado.edu
- (accessed on 19 November 2014).
- JAXA GPM Data Utilization Handbook, First edition. 2014. Edited by JAXA. P. 92.
- 10. Malinowski R., Groom G., Schwanghart W., Heckrath G. Detection and Delineation of Localized Flooding from WorldView-2 Multispectral Data // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 11. P. 14853-14875.
- Martinis S., Rieke C. Backscatter Analysis Using Multi-Temporal and Multi-Frequency SAR Data in the Context of Flood Mapping at River Saale, Germany // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 6. P. 7732–7752.
 Ticehurst C., Guerschman J.P., Chen Y. The Strengths and Limitations in Using the Daily MODIS Open Water Likelihood Algorithm for Identifying Flood Events // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 12. P. 11791–11809.
 Tewaser d P A Mapping at Research flooding in forested watlands using multi-temporal SAR // Photogrammy Eng.
- Townsend P.A. Mapping seasonal flooding in forested wetlands using multi-temporal SAR // Photogramm. Eng. Remote Sensing. 2001. V. 67. P. 857–864.
- 14. Ward D.P., Hamilton S.K., Jardine T.D., Petti N.E., Tews E.K., Olley J.M., Bunn S.E. Assessing the seasonal dynamics of inundation, turbidity, and aquatic vegetation in the Australian wet-dry tropics using optical remote sensing // Ecohydrology. 2013. V. 6. P. 312–323.

Hydrological monitoring in rivers by dual-frequency precipitation radar data: first results

V.Yu. Karaev¹, M.A. Panfilova¹, E.M. Meshkov¹, Yu.A. Titchenko¹, G.N. Balandina¹, Z.V. Andreeva²

¹Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia E-mail: volody@ipfran.ru ²State Research Center "Planeta", Moscow, Russia

Flood monitoring and forecasting are the key challenges to ensure the safety of the population. Modern spaceborne instruments significantly extend the capabilities of the terrestrial hydrological network, as they enable one to perform measurements over large areas. In 2014, the Japan Aerospace Exploration Agency launched spaceborne dual-frequency precipitation radar and thus scientists got a new radar tool for studying the Earth. A software for processing and analyzing the precipitation radar was developed. Precipitation radar measurements made over the Russia land were processed for the first time. The region of the Khabarovsk Territory along the Amur stretch from the Mariinskoye village to the mouth of the river was chosen as a test area, and the spring flood of 2015 was examined on Ku- and Ka-band data of a radar image. Contact measurements were carried out by the hydrological station in the Mariinskoye village. It is shown that the temporal dynamics, i.e., the transition from snow cover to spring flood and its termination, was traced in the radar image. In this case, no significant differences between the data in Ku - and Ka-bands are observed. However, the land relief leads to the dependence of the normalized radar cross section (NRCS) on the scanning direction, which complicates the comparison of radar data obtained in different orbits. Division of the studied area into parts and the accumulation of NRCS measurements at different angles of incidence and in different scanning directions for a year will allow creating a "passport" of an area that takes into account seasonal fluctuations, precipitation, etc., and use it in processing of new data. This will increase the accuracy of the interpretation of the observed effects and the information receiving rate.

Keywords: dual-frequency precipitation radar, normalized radar cross section, spring flood, hydrological monitoring in rivers

Accepted: 30.11.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-185-199

References

- Karaev V.Yu., Panfilova M.A., Titchenko Yu.A., Meshkov Eu.M., Balandina G.N., Andreeva Z.V., Ocenka vozmozhnostei dvuhchastotnogo dozhdevogo radiolokatora dlya resheniya zadach diagnostiki ledyanogo pokrova vnutrennih vodoemov (Estimation of the capabilities of dual-frequencies precipitation radar for diagnostics of the ice cover inland waters), *13 konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (13th Conf. "Current problems in remote sensing of the Earth from space"), Moscow, November 2015, Abstracts, 268 p.
- Karaev V.Yu., Panfilova M.A., Titchenko Yu.A., Meshkov Eu.M., Balandina G.N., Andreeva Z.V., Pervye rezultaty monitoringa I razrusheniya ledyanogo pokrova v zimny period 2014–2015 na ozere Ilmen po dannym dvuhchastotnogo dozhdevogo radiolokatora (The first results of monitoring the formation and destruction of the ice cover in winter 2014–2015 on lake Ilmen according to the measurements of Dual-frequency precipitation radar), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, accepted and will be printed in No. 1–2, 2017.
- Mironov V.L., Komarov S.A., Rychkova N.V., Kleschenko V.N., Izuchenie dielectricheskih svoistv vlazhnyh pochogruntov d SVCh-diapazone (The study of dielectric properties of moist soils in the microwave range), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1994, No. 4, pp. 18–24.
- 4. Romanov A.N., *Dielectricheskie i radioizluchatelnye svoistva zasolennyh pochv v mikrovolnovom diapazone* (Dielectric and radio radiating properties of saline soils in the microwave range), Barnaul: izd. Altaiskogo universiteta, 2002, 118 p.
- Rybalsky N.G., Omelyanenko V.A., Dumnov A.D., Samotesov E.D., Muravjeva E.V., Miroshnichenko N.A., Boriskin D.A., Kurgacheva O.V., Chernogaeva G.M., Pugach S.L., Cherepansky M.M., Demin A.P., Volosuhin V.A., *Gosudarstvenny doklad "O sostoyanii I ispolzovanii vodnyh resursov Rossiiskoi Federacii v 2014 godu"* (State report "The status and use of water resources of the Russian Federation in 2014"), Moscow: NIA-Priroda, 2015, 270 p., http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/dad/gosdokl_.pdf.
- Frolov A.V., Yakovenko M.E., Shumakov I.A., Obzor deyatelnosti Federalnoi sluzhby po gidrometyeorologii I monitoringu okruzhayuschei sredy za 2015 god (An overview of the activities of the Federal service for Hydrometeorology and environmental monitoring in 2015), Moscow: FGBU VNIIGMI-MCD, 2016, 70 p.
- Brakenridge R., Anderson E., MODIS-based flood detection, mapping and measurement: The potential for operational hydrological applications, In: *Transboundary Floods: Reducing Risks through Flood Management*, J. Marsalek, G. Stancalie, G. Balint (Eds.), Springer Netherlands: Berlin, Germany, 2006, pp. 1–12.
- 8. Brakenridge G.R., Kettner A.J., *Dartmouth Flood Observatory*, Available online: http://floodobservatory. colorado.edu (accessed on 19 November 2014).

- 9. JAXA. GPM Data Utilization Handbook, First edition, 2014, edited by JAXA, 92 p.
- 10. Malinowski R., Groom G., Schwanghart W., Heckrath G., Detection and Delineation of Localized Flooding from WorldView-2 Multispectral Data, Remote Sensing, 2015. Vol. 7. No. 11, pp. 14853-14875.

- World View-2 Multispectral Data, *Remote Sensing*, 2015. Vol. 7, No. 11, pp. 14853–14875.
 Martinis S., Rieke C., Backscatter Analysis Using Multi-Temporal and Multi-Frequency SAR Data in the Context of Flood Mapping at River Saale, Germany, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7. No. 6, pp. 7732–7752.
 Ticehurst C., Guerschman J.P., Chen Y. The Strengths and Limitations in Using the Daily MODIS Open Water Likelihood Algorithm for Identifying Flood Events, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 12, pp. 11791–11809.
 Townsend P.A., Mapping seasonal flooding in forested wetlands using multi-temporal SAR, *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 2001, Vol. 67, pp. 857–864.
 Ward D.P., Hamilton S.K., Jardine T.D., Petti N.E., Tews E.K., Olley J.M., Bunn S.E., Assessing the seasonal dynamics of jourdation turbidity and acutation spectration in the Australian wet dry transie using onticel remote
- dynamics of inundation, turbidity, and aquatic vegetation in the Australian wet-dry tropics using optical remote sensing, Ecohydrology, 2013, Vol. 6, pp. 312-323.