Использование слияния оптических и радарных данных при космическом мониторинге водных объектов

О.П. Архипкин, Г.Н. Сагатдинова

Национальный центр космических исследований и технологий Алма-Ата, 050010, Казахстан E-mails: oarkhipkin@rambler.ru, mkmikikz@mail.ru

В работе описываются возможности использования слияния оптических и радарных космоснимков среднего разрешения для формирования и анализа водных поверхностей. В качестве водных объектов рассматриваются зоны затопления вдоль русел рек и водная поверхность водохранилищ. Формирование изображений слияния радарных и оптических данных позволяет повысить информативность космического мониторинга водных объектов и качество получаемых при этом результатов. Приводятся методики формирования изображений слияния оптических и радарных данных как на уровне объектов, так и на точечном уровне. В первом случае вначале проводится раздельное создание масок водной поверхности по оптическим и радарным данным, а затем их совместный анализ. Во втором случае сначала осуществляют геометрическую привязку оптических и радарных данных друг к другу, затем выбирают метод слияния данных, далее проводят слияние этих данных и анализ результатов их совместной обработки. Методы слияния оптических и радарных данных проиллюстрированы на примере прохождения паводковых вод в 2017 г. на р. Ишим в районе пос. Гастелло Акмолинской обл., а также динамики заполнения в 2018 г. Коксарайского контррегулятора и Чардаринского вдхр., расположенных в Туркестанской обл. Казахстана, и Сергеевского вдхр. Северо-Казахстанской обл.

Ключевые слова: космический мониторинг, паводки, водные поверхности, зоны затопления, водохранилище, радарные данные, оптические данные, слияние

Одобрена к печати: 07.10.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-91-100

Введение

После появления в свободном доступе оптических (Landsat-8, Sentinel-2A/B) и радарных (Sentinel-1A/B) данных среднего разрешения стало возможным получать обзорную и детальную информацию о состоянии водных объектов на этом уровне на регулярной основе. При этом использование радарных данных значительно повышает эффективность космического мониторинга водных объектов, так как период прохождения паводковых вод часто сопровождается высокой облачностью, которая приводит к тому, что до 80 % оптических космосним-ков могут быть непригодны для определения зон затопления. Кроме того, наличие съёмки в двух поляризациях у радарных данных Sentinel-1 позволяет также использовать при мониторинге методы радарной поляриметрии (Архипкин, Сагатдинова, 2017).

Ещё больше повышает эффективность космического мониторинга водных объектов совместное использование оптических и радарных данных среднего разрешения (Arkhipkin, Sagatdinova, 2018). Комплексный анализ оптических и радарных данных дистанционного зондирования (ДДЗ) различного разрешения, с одной стороны, позволяет лучше выделять водные поверхности, включая зоны затопления, и определять их структуру, а с другой лучше отследить динамику прохождения паводковых вод и динамику водной поверхности водохранилищ, так как с его помощью можно значительно расширить временной ряд ДДЗ. Необходимость проведения такого комплексного анализа вызывается несколькими причинами, в том числе различным пространственным разрешением, разным временным периодом повторной съёмки, помехами при проведении съёмки (облачность, дымка, шумовые помехи и т.п.) при космическом мониторинге.

Новые возможности для космического мониторинга водных объектов предоставляет использование методов слияния радарных и оптических данных как для получения новой информации, так и для устранения погрешностей при космическом мониторинге водной поверхности по этим данным. Применение совместной обработки различных данных при мониторинге прохождения паводковых вод вдоль русел рек продемонстрировано в публикации (Архипкин, Сагатдинова, 2018). В этой работе показаны возможности использования совместной обработки радарных и оптических данных при мониторинге различных водных объектов, в том числе водохранилищ.

Основные понятия и методы слияния разнородных ДДЗ

Данные дистанционного зондирования различаются по многим параметрам: спектральным характеристикам, радиометрическому разрешению, пространственному разрешению, времени съёмки, сенсорами, типом данных (оптические, радарные, сверхвысокочастотные) и т.д. Интерес к слиянию таких разнородных ДДЗ возник практически сразу, как только приступили к решению конкретных прикладных задач (Pohl, van Genderen, 1998). Основная цель формирования синтезированных изображений состоит в повышении информативности космического мониторинга и в улучшении качества получаемых в результате слияния выходных данных с учётом преимуществ и недостатков конкретных ДДЗ.

Успешным примером слияния разнородных ДДЗ, имеющим разнообразное применение, представляется формирование RGB-композитных изображений из разных каналов одного многоспектрального космоснимка. Другим примером широко применяемого слияния становится слияние панхроматических (PAN) и монохроматических (MX) снимков, полученных одним и тем же сенсором, с помощью процедуры Pansharpening.

В настоящее время для решения широкого круга прикладных задач разработаны разнообразные методы слияния разнородных ДДЗ, в том числе радарных и оптических (Архипкин, Сагатдинова, 2018; Захарова и др., 2011; Копылов и др., 2007; Ghassemian, 2016; Joshi et al., 2016; Markert et al., 2018; Simone et al., 2002). Слияние радарных и оптических данных используется в картографии, сельском и лесном хозяйстве, ирригации, геологических и гидрологических исследованиях, задачах городской инфраструктуры, при чрезвычайных ситуациях (последствия землетрясений, снежный и ледовый покров, выгоревшие площади, оползни и т.п.) и т.д.

Что касается водных объектов, то совместное использование радарных и оптических данных активно применяется и при космическом мониторинге динамики развития паводков, и при различных исследованиях водных объектов (Архипкин, Caratдunoba, 2016, 2018; Родионова, 2019; Arkhipkin, Sagatdinova, 2018; Chaouch et al., 2012; D'Addabbo et al., 2016; Hussain, Shan, 2010; Markert et al., 2018; Tong et al., 2018). Отметим, к примеру, работы Н. В. Родионовой (2019), в которой изучались кольцевые структуры на льду оз. Байкал с помощью данных Sentinel-1 и Sentinel-2, и Д'Аддаббо (D'Addabbo et al., 2016), в которой исследовались наводнения с помощью байесовской сети.

Новые возможности для мониторинга водных объектов дают методы слияния оптических и радарных данных, которые можно разбить на три группы: 1) уровень элементов изображения (точечный уровень); 2) уровень объектов; 3) уровень решений (интерпретации). На точечном уровне каким-либо методом осуществляется слияние данных на уровне пикселей, например с помощью RGB-композита. На уровне объектов вначале проводится раздельное формирование масок водных поверхностей по оптическим и радарным данным, а затем их совместный анализ и формирование единой маски водной поверхности. Эти два уровня и будут рассмотрены ниже.

Слияние оптических и радарных данных среднего разрешения на уровне объектов

При проведении космического мониторинга прохождения паводка по р. Ишим с совместным использованием радарных и оптических данных Sentinel-1/2 было обнаружено, что видна схожая внутренняя структура в зоне затопления, повторяющая русло реки, только на оптическом

снимке она менее выражена (Архипкин, Сагатдинова, 2018). При формировании водной поверхности эта структура исчезает на оптическом снимке и остаётся на радарном. Этот эффект объяснили тем, что водные поверхности с затопленной растительностью часто по радарным снимкам не классифицируются как водные, а по оптическим — классифицируются.

В работе Л. Пулвиренти (Pulvirenti et al., 2011) эту проблему предлагается решать с помощью моделей электромагнитного рассеяния в сочетании с гидрологической и контекстуальной информацией. Нами же было предложено решать её с помощью слияния оптических и радарных данных на уровне объектов (Архипкин, Сагатдинова, 2018). При слиянии оптических и радарных данных на этом уровне получаем для каждого из них маски водных поверхностей, проводим их совместный анализ и получаем итоговую единую водную поверхность, состоящую из чистой водной поверхности и водной поверхности с затопленной растительностью (*puc. 1a*). Качество выделения затопленной растительности иллюстрирует *puc. 16*, в котором контур маски затопленной растительности (см. *puc. 1a*) наложен красным цветом на космоснимок высокого разрешения. С учётом разницы в пространственном разрешении (20 и 1 м соответственно) затопленная растительность по результатам слияния оптических и радарных данных на уровне объекта выделилась достаточно хорошо.



Рис. 1. Комбинированная маска воды р. Ишим в районе пос. Гастелло Акмолинской обл., полученная при слиянии радарных данных Sentinel-1 и оптических Sentinel-2 за 1 мая 2017 г. (*a*); фрагмент контура маски затопленной растительности, наложенный красным цветом на космоснимок высокого разрешения (б)

Подобный подход был распространён и на водохранилища. Так, при совместном проведении космического мониторинга водной поверхности Коксарайского контррегулятора по данным Sentinel-1 и Sentinel-2 получен следующий результат. Анализ совместного временного ряда (*puc. 2a*) показывает, что площади водной поверхности, полученные по радарным данным Sentinel-1, меньше полученных по оптическим данным Sentinel-2 для больших площадей и практически идентичны при малых. Можно продемонстрировать этот вывод, построив огибающие кривые диаграмм. В этом случае огибающая радарных данных будет ниже огибающей оптических данных для больших площадей и они практически совпадут при малых.

Разницу в определении площади водной поверхности между оптическими и радарными данными среднего разрешения можно в значительной степени объяснить двумя причинами. Первая связана с особенностями радарной съёмки, которая характеризуется зернистостью получаемых при этом снимков. Эту разницу можно существенно минимизировать специальной обработкой, значительно уменьшающей влияние зернистости радарных снимков. Она включает использование двух поляризаций радарных снимков Sentinel-1 и фильтров при

вычислении водных поверхностей. Отметим, что данные Sentinel-1 на *puc. 2a* откорректированы по зернистости. Вторая причина разницы в определении площадей связана с затопленной растительностью. Её можно существенно уменьшить при больших площадях с помощью слияния оптических и радарных данных, а при малых необходимости в этом нет, видимо, по причине отсутствия в этом случае затопленной растительности.



Рис. 2. Совместная динамика заполнения Коксарайского контррегулятора по данным Sentinel-2 и некорректированным (*a*) и откорректированным (*б*) данным Sentinel-1 и за 2018 г.

Анализируя радарные и оптические снимки, видим, что, как и для речных систем, пространственное расположение зон затопленной растительности проявляется и на оптических снимках, только на них эти зоны менее выражены. При формировании водной поверхности эта структура исчезает на оптических снимках и остаётся на радарных. Но на более поздних оптических снимках при спаде воды в водохранилище растительность также появляется.

Проведение корректировки радарных данных с помощью слияния с оптическими данными позволяет существенно уменьшить разницу по сравнению с оптическими при больших площадях, а при малых, как говорилось выше, необходимости в этом нет. В результате получаем совместную динамику заполнения Коксарайского контррегулятора по данным Sentinel-1 и Sentinel-2, в которой эти данные хорошо коррелируют между собой (*puc. 26*). Функционирование методики слияния оптических и радарных данных на уровне объектов для водной поверхности продемонстрируем на примере мониторинга Коксарайского контррегулятора по данным Sentinel-1 за 22 мая. В процедуре слияния данных используется ближайший предшествующий оптический снимок. Если ближайший оптический снимок снят задолго до радарного, то проводится дополнительная корректировка по ближайшему последующему оптическому снимку. Так, для получения маски водной поверхности Коксарайского контррегулятора по радарным данным Sentinel-1 за 22 мая проводилась корректировка по данным Sentinel-2 за 15 и 25 мая 2018 г. (*рис. 3а*).



Рис. 3. Фрагмент маски водной поверхности Коксарайского контррегулятора, полученной при слиянии радарных данных Sentinel-1 за 22 мая и оптических Sentinel-2 за 15 и 25 мая 2018 г. (*a*); фрагмент контура маски затопленной растительности, наложенный красным цветом на космоснимок Sentinel-2 за 9 июня 2018 г. (*б*)

Индикатором в определении площади водной поверхности Коксарая между оптическими и радарными данными среднего разрешения может служить разный уровень затопления растительности, что подтверждается более поздними оптическими снимками. Так, на снимке 9 июня растительность уже видна ясно и хорошо укладывается в контур маски затопленной растительности, полученный по радарным данным Sentinel-1 за 22 мая с помощью слияния с оптическими данными Sentinel-2 (*puc. 36*).

Слияние оптических и радарных данных среднего разрешения на точечном уровне

Методика слияния радарных и оптических данных среднего разрешения на точечном уровне позволяет устранять ошибки при космическом мониторинге водных объектов как радарных, так и оптических данных. Ошибки при обработке радарных данных вызваны зернистостью радарных снимков, условиями съёмки (угол визирования, скорость ветра в момент съёмки), наличием плоских участков. При этом имеются ошибки и первого, и второго рода: часть водных пикселей воспринимается как неводные и, наоборот, неводные воспринимаются как водные. Ошибки оптических снимков обусловлены, прежде всего, наличием облачности и дымки, которые не позволяют провести качественную съёмку подстилающей поверхности, экранируемой ими.

Алгоритм слияния оптических и радарных данных на точечном уровне включает в себя процедуру геометрической привязки оптических и радарных данных друг к другу. Эта

процедура отрабатывалась в свободно распространяемом программном обеспечении SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform). Этот программный комплекс может работать с любыми ДДЗ, но прежде всего предназначен для работы с данными спутников Sentinel. Отметим, что оптические данные Sentinel-2 и Landsat имеют хорошую привязку. Проблемы были с привязкой радарных данных Sentinel-1. Она решалась при введении вместо оперативных орбитальных данных. Тогда и привязка радарных данных соответствовала привязке оптических.

При слиянии радарных и оптических данных наряду с разными каналами снимков используются и различные индексы, в частности радарный индекс шероховатости (по каналам вертикально-вертикальной (VV) — вертикально-горизонтальной (VH) поляризации), оптический NDVI (*англ*. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), индекс влажности (*англ*. Moisture Index — MI), равный (*b*8A – *b*11)/(*b*8A + *b*11), SWB (*англ*. Soils and Water bodies — почвы и водоёмы) = *b*2/*b*11, где *b* — каналы Sentinel-2.

Приведём теперь примеры уменьшения ошибок, получаемых при обработке и радарных, и оптических данных как для паводков вдоль русел рек, так и для водохранилищ. Вначале покажем пример исправления ошибок масок воды при обработке радарных данных с помощью слияния с оптическими данными. Так, на *puc. 4a* приведена маска водной поверхности на р. Ишим в районе пос. Гастелло, полученная по радарному снимку за 1 мая 2017 г. Сравнение этих данных с оптическими показывает, что маска воды, полученная по радарным данным, содержит много ошибок отнесения неводной поверхности к водной (красные пиксели в изгибе реки). При создании маски водной поверхности, полученной при слиянии радарного и оптического снимков с помощью совместного анализа радарного параметра «шероховатость» и оптического SWB, число ошибок в излучине реки резко уменьшилось, практически свелось к минимуму (*puc. 46*).



Рис. 4. Маска воды, полученная по снимку Sentinel-1 за 1 мая 2017 г. (*a*), и маска воды, полученная при совместном анализе радарного параметра «шероховатость» и оптического SWB, полученных по сним-кам Sentinel-1/2 за 1 мая 2017 г. (б), для р. Ишим в районе пос. Гастелло, наложенные на маску NDVI

Представленный на *puc. 4* случай, когда даты оптического и радарного снимков совпадают, достаточно редкий. На практике при слиянии обычно используются оптические и радарные снимки, полученные в разные, но близкие даты. На *puc. 5a* (см. с. 97) маска водной поверхности Сергеевского вдхр., полученная по радарным данным Sentinel-1B, содержит много ошибочных пикселей, которые устраняются при слиянии разновременных радарных и оптических данных (*puc. 56*). При этом для корректировки использовался индекс влажности, получаемый по оптическим данным Sentinel-2.

Рассмотрим теперь случай, когда с помощью радарного снимка можно откорректировать оптический. Слияние оптических данных с радарными позволяет уменьшить влияние

облачности на водную поверхность, определённую только по оптическим данным (*puc. 6a*). Из рисунка видно, что значительная часть водной поверхности не идентифицируется из-за облачности по снимку Sentinel-2 за 21 ноября 2018 г. Для этой же территории имеется радарный снимок Sentinel-1 за 18 ноября. Используем его для корректировки маски водной поверхности, полученной по оптическим данным (см. *puc. 6a*). Слияние данных проводим через совместный анализ радарного параметра «шероховатость» и оптического SWB. По результатам анализа сформирована маска водной поверхности, представленная на *puc. 66*. Она содержит в себе и водную поверхность, находящуюся под облачным покровом. Отметим, что для уменьшения потери данных такой анализ проводится только для территории, покрытой облачностью, с использованием маски облачности.



Рис. 5. Маска водной поверхности по космоснимку Sentinel-1В в районе Сергеевского вдхр. за 12 августа 2018 г. без использования оптического снимка Sentinel-2 за 7 августа 2018 г. (*a*) и с его использованием (*б*)



Рис. б. Маска водной поверхности Чардаринского вдхр. по оптическому космоснимку Sentinel-2 за 21 ноября 2018 г. без использования радарного снимка за 18 ноября 2018 г. (*a*) и с его использованием (*б*), наложенная на космоснимок Sentinel-2

Применение слияния данных для корректировки водной поверхности, полученной по облачным оптическим данным при прохождении паводковых вод вдоль русел рек, продемонстрировано в работе (Архипкин, Сагатдинова, 2018). В ней для р. Ишим в районе пос. Гастелло маска воды, полученная по облачному снимку Landsat-8 за 26 апреля 2017 г., откорректирована путём совместного анализа с радарным снимком Sentinel-1 за 24 апреля.

Выводы

Использование слияния радарных и оптических данных при космическом мониторинге паводков позволяет существенно усилить его функциональные возможности. Так, слияние на уровне объектов даёт возможность выделить дополнительные классы, в том числе класс «затопленная прибрежная растительность», с помощью которого, в свою очередь, можно провести корректировку определённой по радарным данным площади водной поверхности.

Это позволяет образовать единый, скоррелированный по радарным и оптическим данным временной ряд динамики площади водной поверхности исследуемых водных объектов, что значительно увеличивает возможности мониторинга. Особо отметим, что без оптических данных такую корректировку радарных данных провести было невозможно, так как часть наземных объектов на радарных снимках имеет такие же характеристики, что и затопленная прибрежная растительность.

Слияние радарных и оптических данных на точечном уровне позволяет существенно сократить погрешности выделения водных поверхностей, обусловленных особенностями радарной и оптической съёмки. Особенно полезно использование такой методики для корректировки радарных данных, условия съёмки которых могут приводить к большим погрешностям при выделении водных поверхностей.

Работы финансируются в рамках целевой программы BR05336383 Аэрокосмического комитета Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан.

Литература

- 1. *Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н.* Использование различных оптических и радарных данных дистанционного зондирования при оперативном космическом мониторинге паводков в Казахстане // Журн. Сибирского федер. ун-та. Техника и технология. 2016. Т. 9. № 7. С. 1045–1058.
- 2. *Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н.* Использование поляриметрических радарных данных при космическом мониторинге паводков и наводнений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 175–184.
- Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н. Исследование возможностей синтеза оптических и радарных данных при космическом мониторинге паводков // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018: сб. ст. 16-й конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 12–16 нояб. 2018, Москва. М.: ИКИ РАН, 2018. С. 343– 350. DOI: 10.21046/rorse2018.343.
- 4. Захарова Л. Н., Захаров А. И., Сорочинский М. В., Рябоконь Г. П., Леонов В. М. Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 1. С. 5–19.
- 5. *Копылов В. Н., Полищук Ю. М., Хамедов В. А.* Методические вопросы использования космических снимков для оперативной оценки последствий лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 1. С. 155–161.
- 6. *Родионова Н. В.* Наблюдение кольцевых структур на льду озера Байкал с помощью спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 весной 2016–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 213–221.
- Arkhipkin O. P., Sagatdinova G. N. Possibilities of the joint use of optical and radar data in flood space monitoring, The International Archives of the Photogrammetry // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. 2018. V. 42. Ser. 3W4. P. 67–73. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-67-2018.
- 8. *Chaouch N., Temimi M., Hagen S., Weishampel J., Medeiros S., Khanbilvardi R.* A synergetic use of satellite imagery from SAR and optical sensors to improve coastal flood mapping in the Gulf of Mexico // Hydrological Processes. 2012. V. 26. P. 1617–1628. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.8268.

- D'Addabbo A., Refice A., Pasquariello G., Lovergine F. P., Capolongo D., Manfreda S. A Bayesian Network for Flood Detection Combining SAR Imagery and Ancillary Data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54. No. 6. P. 3612–3625. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2520487.
- 10. *Ghassemian H*. A review of remote sensing image fusion methods // Information Fusion. 2016. V. 32 No. PA. P. 75–89. DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.03.003.
- Hussain E., Shan J. Mapping major floods with optical and SAR satellite images. Purdue University. 2010. 4 p. URL: https://engineering.purdue.edu/~jshan/publications/2010/IGARSS_flood_formatted_Hussain_ Shan.pdf.
- Joshi N. P., Baumann M., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Hostert P., Jepsen M. R., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T., Reiche J., Ryan C. M., Waske B. A Review of the Application of Optical and Radar Remote Sensing Data Fusion to Land Use Mapping and Monitoring // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. No. 70. 23 p. DOI: https://doi.org/10.3390/rs8010070.
- 13. *Markert K. N., Chishtie F., Anderson ER., Saah D., Griffin R. E.* On the merging of optical and SAR satellite imagery for surface water mapping applications // Results in Physics. 2018. No. 9. P. 275–277.
- 14. *Pohl C., van Genderen J. L.* Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // Intern. J. Remote Sensing. 1998. V. 19. No. 5. P. 823–854. DOI: 10.1080/014311698215748.
- Pulvirenti L., Pierdicca N., Chini M., Guerriero L. An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. No. 11(2). P. 529–540.
- Simone G., Farina A., Morabito F.C., Serpico S.B., Bruzzone L. Image fusion techniques for remote sensing applications // Information Fusion. 2002. V. 3. Iss. 1. P. 3–15. DOI: https://doi.org/10.1016/ S1566-2535(01)00056-2.
- Tong X., Luo X., Xie H., Chao W., Liu S., Jiang Y., Makhinov A. N., Makhinova A. F. An approach for flood monitoring by the combined use of Landsat 8 optical imagery and COSMO-SkyMed radar imagery // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. 136. P. 144–153. DOI: https://doi.org/10.1016/j. isprsjprs.2017.11.006.

The application of optical and radar data fusion in space monitoring of water objects

O. P. Arkhipkin, G. N. Sagatdinova

National Centre for Space Research and Technology, Almaty 050010, Kazakhstan E-mails: oarkhipkin@rambler.ru, mkmikikz@mail.ru

The paper describes the possibilities of using fusion (synthesis) of optical and radar medium-resolution space images for the formation and analysis of water surfaces. Flooding zones along river beds and water surface of reservoirs are considered water objects. The formation of fusion images using radar and optical data allows increasing the information content of space monitoring of water objects and the quality of the obtained results. Methods for the formation of fusion images of optical and radar data both at the object level and at the point level are presented. In the first case, water surfaces are first separately formed from optical and radar data, and then their joint analysis is carried out. In the second case, first geometric binding of optical and radar data to each other is carried out, then methods of data fusion are selected, then synthesis of these data and analysis of fusion results are carried out. The methods of fusion of optical and radar data are illustrated by the example of the passage of flood waters in 2017 on the Ishim River in the area of the village of Gastello, Akmola Region, as well as the dynamics of filling in 2018 the Koksaray counter-regulator and the Chardarin reservoir located in the Turkestan region of Kazakhstan, and the Sergeyevsky reservoir of the North Kazakhstan Region.

Keywords: space monitoring, flood, water surfaces, flood zones, radar data, optical data, fusion

Accepted: 07.10.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-91-100

References

- 1. Arkhipkin O. P., Sagatdinova G. N., Ispol'zovanie razlichnykh opticheskikh i radarnykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri operativnom kosmicheskom monitoringe pavodkov v Kazakhstane (The Use of Various Optical and Radar Remote Sensing Data in Operative Space Monitoring of Flood in Kazakhstan), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologiya*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 1045–1058.
- 2. Arkhipkin O. P., Sagatdinova G. N., Ispol'zovanie polyarimetricheskikh radarnykh dannykh pri kosmicheskom monitoringe pavodkov i navodnenii (The use of polarimetric radar data for space monitoring of high waters and floods), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 175–184.
- 3. Arkhipkin O. P., Sagatdinova G. N., Issledovanie vozmozhnostei sinteza opticheskikh i radarnykh dannykh pri kosmicheskom monitoringe pavodkov (Research of possibilities of synthesis of optical and radar data in flood space monitoring), *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli RORSE 2018*, *Proc.*, 2018, pp. 343–350, DOI: 10.21046/rorse2018.343.
- 4. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Sorochinskyi M. V., Ryabokon G. P., Leonov V. M., Joint analysis of the data of optical and radar sensors: potentialities, limitations, and prospects, *J. Communications Technology and Electronics*, 2011, Vol. 56, No. 1, pp. 1–13.
- 5. Kopilov V.N., Polishchuk Yu. M., Khamedov V.A., Metodicheskie voprosy ispol'zovaniya kosmicheskikh snimkov dlya operativnoi otsenki posledstvii lesnykh pozharov (Methodological issues related to the use of space imagery for rapid assessment of forest fires), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 1, pp. 155–161.
- Rodionova N. V., Nablyudenie kol'tsevykh struktur na l'du ozera Baikal s pomoshch'yu sputnikov Sentinel-1 i Sentinel-2 vesnoi 2016–2018 gg. (Observation of ice rings on Lake Baikal using Sentinel-1, 2 images in spring 2016–2018), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 213–221, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-213-221.
- Arkhipkin O. P., Sagatdinova G. N., Possibilities of the joint use of optical and radar data in flood space monitoring, *Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* – *ISPRS Archives*, 2018, Vol. 42, Ser. 3W4, pp. 67–73, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-67-2018.
- Chaouch N., Temimi M., Hagen S., Weishampel J., Medeiros S., Khanbilvardi R., A synergetic use of satellite imagery from SAR and optical sensors to improve coastal flood mapping in the Gulf of Mexico, *Hydrological Processes*, 2012, Vol. 26, pp. 1617–1628, DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.8268.
- 9. D'Addabbo A., Refice A., Pasquariello G., Lovergine F. P., Capolongo D., Manfreda S., A Bayesian Network for Flood Detection Combining SAR Imagery and Ancillary Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 6, pp. 3612–3625, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2520487.
- 10. Ghassemian H., A review of remote sensing image fusion methods, *Information Fusion*, Vol. 32, No. PA, pp. 75–89, 2016, DOI: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.03.003.
- 11. Hussain E., Shan J., *Mapping major floods with optical and SAR satellite images*, Purdue University, 2010, 4 p., available at: https://engineering.purdue.edu/~jshan/publications/2010/IGARSS_flood_formatted_Hussain_Shan.pdf.
- Joshi N. P., Baumann M., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Hostert P., Jepsen M. R., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T., Reiche J., Ryan C. M., Waske B., A Review of the Application of Optical and Radar Remote Sensing Data Fusion to Land Use Mapping and Monitoring, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Art. No. 70, 23 p., DOI: https://doi.org/10.3390/rs8010070.
- 13. Markert K. N., Chishtie F., Anderson E. R., Saah D., Griffin R. E., On the merging of optical and SAR satellite imagery for surface water mapping applications, *Results in Physics*, 2018, No. 9, pp. 275–277.
- 14. Pohl C., van Genderen J. L., Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications, *Intern. J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, No. 5, pp. 823–854, DOI: 10.1080/014311698215748.
- 15. Pulvirenti L., Pierdicca N., Chini M., Guerriero L., An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, No. 11(2), pp. 529–540.
- Simone G., Farina A., Morabito F.C., Serpico S.B., Bruzzone L., Image fusion techniques for remote sensing applications, *Information Fusion*, 2002, Vol. 3, Issue 1, pp. 3–15, DOI: https://doi.org/10.1016/ S1566-2535(01)00056-2.
- Tong X., Luo X., Xie H., Chao W., Liu S., Jiang Y., Makhinov A. N., Makhinova A. F., An approach for flood monitoring by the combined use of Landsat 8 optical imagery and COSMO-SkyMed radar imagery, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, Vol. 136, pp. 144–153, DOI: https://doi.org/10.1016/j. isprsjprs.2017.11.006.