Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутска по разновременным данным космической съёмки

Е. Д. Корнилова¹, И. Н. Крыленко^{1,2}, П. П. Головлев¹, А. А. Сазонов^{1,2}, А. Н. Никитский³

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия E-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com
² Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия ³ ГК «СКАНЭКС», Москва, 108811, Россия

Работа посвящена исследованию площадей и границ затопления пойм с применением данных дистанционного зондирования и методов гидродинамического моделирования совместно с ГИС-технологиями. В качестве объекта исследования выбран участок р. Лены у г. Якутска протяжённостью 75 км. Математическое моделирование проводилось с использованием программного комплекса Stream_2D (Беликов, Кочетков, 2014), в основу которого положено решение двумерных уравнений Сен-Венана. Дешифрирование космических снимков проводилось в программном комплексе ERDAS Imagine с использованием автоматического способа классификации k-means (k-среднего), основанного на методах кластерного анализа. По итогам работы построены зависимости площадей затопления пойм, определённых на основе двух независимых методов, от расхода воды и показано хорошее соответствие результатов моделирования и дешифрирования космических снимков во всем диапазоне наблюдавшихся расходов воды. Таким образом, данные дистанционного зондирования позволяют провести качественную верификацию гидродинамической модели, при этом точность оценок площадей затопления главном образом зависит не от типа применяемых спутниковых данных, а от гидрологической обстановки, которая количественно выражается расходом воды, а также наличием или отсутствием ледовых явлений.

Ключевые слова: моделирование, гидродинамическая модель, данные дистанционного зондирования, затопление, пойма, космические снимки, гидрология, Лена, Якутск, ледовые заторы

Одобрена к печати: 30.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178

Введение

Комплексное использование речных пойм требует детальных оценок характеристик их затопления в период половодья и паводков. Одним из перспективных методов, позволяющих детально оценить пространственное распределение характеристик водного потока на пойме, являются двумерные гидродинамические модели. На основе входной информации о рельефе они позволяют оценить уровни воды, глубины водного потока, границы затопления, поле скоростей течения для различных сценариев. С другой стороны, информация о границах затопления пойм может быть получена на основе данных дистанционного зондирования Земли (Айбулатов и др., 2015; Книжников и др., 2011). Сопоставление результатов моделирования на основе гидродинамических моделей с результатами дешифрирования космических снимков позволяет сопоставить границы затопления, полученные двумя разными методами, и провести дополнительную верификацию модели (Крыленко, 2005; Belikov et al., 2015). При наличии космических снимков за разные фазы водного режима появляется возможность подробно исследовать и сопоставить зависимости площадей затопления от входного расхода воды на основе двух независимых методов, что и будет продемонстрировано в данной статье на примере участка долины р. Лены у г. Якутска.

В районе г. Якутска на р. Лене сосредоточены многочисленные инженерные и водохозяйственные объекты, для безопасного функционирования которых необходимо учитывать особенности водного и руслового режима реки, что обусловило большое количество исследований, посвящённых русловым процессам на данном участке (Зайцев, Чалов, 1989; Чалов и др., 2012, 2016), в том числе и на основе методов математического моделирования (Zaitsev et al., 2004). Проведённая в нашем исследовании верификация гидродинамической модели STREAM_2D, адаптированной для исследуемого участка р. Лены, повысит надёжность получаемых на её основе практических рекомендаций о возможных вариантах инженерных решений для уменьшения неблагоприятного воздействия русловых процессов.

Описание применяемых методов и исходных данных

Для гидродинамического моделирования использовался программный комплекс STREAM_2D (Беликов, Кочетков, 2014), основанный на численном решении двумерных уравнений Сен-Венана в приближении мелкой воды (Беликов, Семенов, 1997; Кюнж и др., 1985). Программный комплекс STREAM_2D позволяет строить гибридные треугольно-четырёхугольные сетки с переменным шагом. В центры ячеек расчётной сетки интерполируется информация о рельефе пойм и русел, и для этих же ячеек модель даёт на выходе отметки водной поверхности, глубины потока, векторное поле осредненных по глубине скоростей течения.

Основным калибровочным параметром в уравнениях Сен-Венана является коэффициент шероховатости. Перед расчётом задаётся типичное значение шероховатости для данного типа русла и поймы (Барышников, 2003); затем, после расчёта, на основании того, каким образом отличаются уровень воды и скорость течения от фактических, корректируют коэффициент шероховатости: если расчётный уровень воды выше, а расчётная скорость течения меньше фактических, то коэффициент шероховатости необходимо уменьшить, если наоборот — увеличить. Следующим этапом при моделировании является верификация (валидация) модели, т.е. проверка её на независимом материале. В качестве материалов для верификации используются данные гидрологических наблюдений, аналогичные данным, применявшимся для калибровки модели, но соответствующие другой гидрологической ситуации (например, при других расходах воды). Площадь затопления, полученная по результатам моделирования, также может быть сопоставлена с результатами дешифрирования космических снимков за те же даты.

Исходными данными для применения гидродинамической модели являлись материалы полевых исследований лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ, включая результаты батиметрических съёмок, измерений расходов воды, отметок водной поверхности, а также данные режимных наблюдений по гидрологическим постам р. Лена — Табага, Якутск, Кангалассы. Для задания рельефа поймы привлекались данные топографических карт и полевых съёмок.

Область моделирования охватывает участок протяжённостью 75 км от мыса Табага до мыса Кангалассы при ширине пойм р. Лены более 10 км. Расчётная сетка модели включает более 68 000 ячеек с шагом от 30 до 80 м в руслах и от 80 до 200 м на поймах. Калибровка и верификация модели на первом этапе проведены на основе данных об измеренных расходах воды и отметках урезов водной поверхности по данным экспедиционных изысканий, проводившихся в летний период 2016 г., и показали хорошее соответствие смоделированных и измеренных характеристик водного потока.

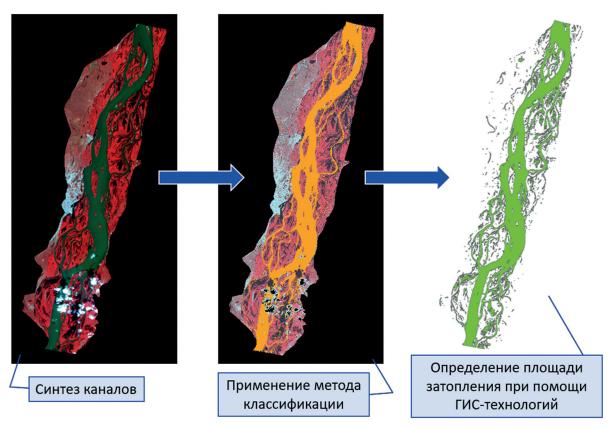
Для получения информации о затоплении по дистанционным данным использовались снимки американской космической системы Landsat-5, -7, -8, предоставляемые Геологической службой США (https://www.earthexplorer.usgs.gov, accessed 29.09.2016—15.04.2017) (пространственное разрешение 30 м), и снимки французского спутника SPOT-5 (© CNES 2017, Distribution Airbus DS) (пространственное разрешение — 10 м). Космические снимки спутника SPOT были предоставлены ГК «СКАНЭКС» через Геопортал географического факультета МГУ.

Перед дешифрированием уточнялась координатная привязка снимков SPOT с помощью снимков высокого разрешения спутника WorldView-2 (© DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved (2013)) за 24 июля 2013 г., а также снимков Landsat.

Дешифрирование космических снимков проводилось в программном комплексе ERDAS Imagine с использованием автоматического способа классификации k-means (k-среднего), основанного на методах кластерного анализа (Kanungo et al., 2002). Для дешифрирования применялись следующие комбинации каналов: 4, 5 и 3 — Landsat-5, -7; 5, 6 и 4 — Landsat-8; 1, 4, 3 — SPOT 5. Целью данного метода является разделение значений яркости снимка на k кластеров, при этом тот или иной пиксель относится к тому кластеру, к центру которого он ближе всего находится. После того как в результате итераций кластеры приобрели устойчивые границы, выбирались классы, которые соответствуют водной поверхности. Если на снимке наблюдалась облачность, то урез воды после автоматизированной классификации дооцифровывался вручную. Оценка площади водной поверхности и сопоставление границ затопления проводились в программном комплексе ESRI ArcGIS (*puc. 1*).

Для определения границ затопления пойм на основе гидродинамической модели проводилось моделирование для расходов воды за те периоды, в которые были получены космические снимки. В качестве верхнего граничного условия при моделировании задавались среднесуточные расходы воды по гидрологическому посту Табага. Для получения информации о ледовых явлениях и контроля соответствия смоделированных и наблюдённых уровней воды привлекались данные гидрологического поста Якутск. На период ледовых явлений коэффициент шероховатости повышался до значений 0,035 в основных руслах, а для условий ледового затора — до 0,075 на затороопасных участках.

Благодаря достаточному количеству космических снимков (около 20) на исследуемую территорию был охвачен весь диапазон гидрологических ситуаций, при которых происходит затопление пойм р. Лены, включая ледовые заторы, максимальные расходы половодий, летние паводки (*табл. 1*).

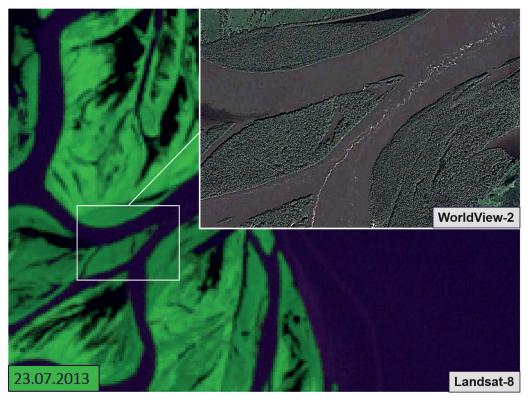


Puc. 1. Этапы определения площади затопления на реке Лена в пределах участка в районе г. Якутска

 Таблица 1. Результаты и оценка двух методов (дешифрирование и моделирование)

 определения площади затопления пойм

| № | Дата | Расход, | Спутник | Площадь затопления, км ² | | | Относительная | | |
|----|---|-------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--|---------------------------|--|
| | | м ³ /с | | Косми- | Модель | | ошибка по сравнению с космоснимком, % | | |
| | | | | снимки | наблюдённые гидрографы | численные эксперименты | наблюдённые гидрографы | численные эксперименты | |
| 1 | 21.06.2006 | 48300 | Landsat-5 | 696 | 698 | 717 | -0,3 | -3,1 | |
| 2 | 15.06.2007 | 36300 | Landsat-5 | 607 | 613 | 642 | -1,0 | -5,7 | |
| 3 | 09.06.2008 | 27900 | Landsat-7 | 498 | 499 | 509 | -0,2 | -2,3 | |
| 4 | 10.06.2008 | 29300 | Landsat-5 | 500 | 510 | 540 | -2,0 | -8,0 | |
| 5 | 25.05.2008 | 29400 | Landsat-5 | 536 | 543 | 542 | -1,3 | -1,1 | |
| 6 | 04.06.2009 | 34400 | Landsat-5 | 553 | 587 | 621 | -6,1 | -12,3 | |
| 7 | 11.05.2011 | 17700 | SPOT 5 | 303 | 297 | 313 | 2,0 | -3,5 | |
| 8 | 15.05.2011 | 42400 | SPOT 5 | 694 | 695 | 688 | -0,1 | 0,8 | |
| 9 | 07.08.2012 | 23800 | SPOT 5 | 436 | 463 | 426 | -6,2 | 2,4 | |
| 10 | 13.05.2013 | 24300 | SPOT 5 | 317 | 324 | 435 | -2,2 | -37,4 | |
| 11 | 17.05.2013 | 40100 | SPOT 5 | 701 | 711 | 674 | -1,4 | 3,9 | |
| 12 | 24.07.2013 | 33200 | Landsat-8 | 529 | 581 | 607 | -9,8 | -14,7 | |
| 13 | 15.05.2014 | 21900 | SPOT 5 | 404 | 409 | 390 | -1,2 | 3,5 | |
| 14 | 01.08.2016 | 30000 | Landsat-8 | 514 | 528 | 555 | -2,7 | -8,0 | |
| | Снимки на даты с ледовыми заторами и ледовыми явлениями | | | | | | | | |
| 15 | 14.05.2007 | 30800 | Landsat-5 | 674 | 673 | 659 | 0,1 | 2,2 | |
| 16 | 11.05.2009 | 20200 | Landsat-7 | 548 | 526 | 507 | 4,0 | 7,5 | |
| 17 | 06.05.2014 | 15900 | SPOT 5 | 419 | 342 | 395 | 18,4 | 5,7 | |
| 18 | 10.05.2014 | 16200 | SPOT 5 | 384 | 359 | 403 | 6,5 | -4,9 | |

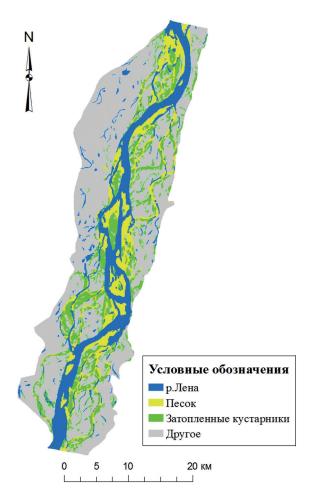


Puc. 2. Сопоставление снимка Landsat и снимка спутника WorldView-2 с высоким разрешением (24.07.2013)

Сопоставление площадей водной поверхности по результатам дешифрирования и результатам гидродинамического моделирования показало, что наилучшее соответствие наблюдается при полностью затопленной пойме при прохождении максимальных расходов воды р. Лены (более $40~000~\text{m}^3/\text{c}$).

При других гидрологических ситуациях за отдельные даты (№ 14 и 17 в *табл. 1*) обнаружилось, что площадь затопления, полученная на основе гидродинамической модели, была значительно выше, чем определённая по космическим снимкам. Анализ данных режимных наблюдений гидрологических постов показал, что в эти даты наблюдались расходы воды, соответствующие началу выхода воды на пойму (около 25 000—30 000 м³/с). На *рис. 2* (см. с. 172) представлен пример сопоставления снимка Landsat-8 OLI и снимка со спутника WorldView-2 с высоким разрешением за 24.07.2013. Через разреженные фрагменты растительности видно, что кустарники затоплены, но в связи с тем, что растительный покров сильно сомкнут, спутниковый снимок Landsat-8 OLI не отображает данные участки как затопленные. Такая же ситуация отмечалась 01.08.2016, когда по данным визуальных наблюдений в ходе полевых изысканий участки поймы, заросшей кустарниками, были залиты водой, а при дешифрировании снимка они отобразились как незатопленные.

С целью выявления пространственного распространения данного типа кустарниковой растительности была дополнительно составлена карта-схема типов подстилающей поверхности исследуемого участка (рис. 3). Карта-схема составлялась при помощи классификации с обучением на основе дешифрирования высокодетальных космических снимков со спутников WorldView-2 и Landsat-8 за период межени, а также путём дешифрирования снимков для ситуации, когда наблюдалось экстремально высокое значение расхода воды (№ 1 в табл. 1), и на которых при определённом синтезе каналов (комбинация 4, 5 и 3 — Landsat-5, -7; 5, 6 и 4 — Landsat-8) влажная растительность отображается более тёмным цветом. Площадь затопления для снимков за даты с расходами 25 000—30 000 м³/с в дальнейшем определялась



с учётом полученной маски растительности с постоянной площадью. Затопление участка, покрытого кустарниками, помимо космических снимков, было подтверждено цифровой моделью рельефа и полевыми наблюдениями.

В итоге было получено хорошее соответствие результатов моделирования по сравнению с результатами дешифрирования космических снимков во всем диапазоне наблюдавшихся расходов воды. Максимальные относительные погрешности моделирования соответствуют датам, когда наблюдись ледовые заторы (N_{2} 15–18 в *табл. 1*). Коэффициент корреляции между значениями площадей затопления, определёнными двумя независимыми методами, составил 0,98. Стоит отметить, что значения площадей затопления, определённые на основе гидродинамической модели, в целом завышены по сравнению с результатами дешифрирования, что связано с подробностью имеющихся в наличии данных о рельефе и степенью детальности модельной сетки, в которую интерполируются эти данные.

Puc. 3. Карта-схема типов подстилающей поверхности по результатам дешифрирования космических снимков

Река Лена на исследуемом участке имеет сложную конфигурацию мелких проток, которые невозможно полностью учесть при создании цифровой модели рельефа и расчётной сетки модели. Но тем не менее конкретно для задачи исследования площадей затопления дальнейшая детализация нецелесообразна в связи с тем, что погрешности достаточно низки.

Для обобщения результатов исследования были построены графики зависимости площади затопления пойм, определённой на основе двух независимых методов, от входного расхода воды (рис. 4). Отдельно выделены ситуации с ледовыми заторами. Зависимости площади затопления от расхода воды, полученные для реально наблюдённых половодий и паводков на основе гидродинамического моделирования и дешифрирования, можно выразить уравнениями (maбл. 2). В пределах диапазона рассмотренных гидрологических ситуаций полученные уравнения хорошо отражают зависимость площади затопления от входного расхода воды (теснота связи R > 0.95).

 $\it Таблица~2$. Уравнения, выражающие зависимость площади затопления от входного расхода воды, полученные на основе гидродинамического моделирования реально наблюдённых половодий и паводков ($\it F--$ площадь затопления, $\it Q--$ расход воды)

| Способ определения площадей затопления | Уравнение | | | | |
|--|--------------------------------|--|--|--|--|
| Модель | $F = 444 \times \ln(Q) - 4059$ | | | | |
| Дешифрирование | $F = 451 \times \ln(Q) - 4125$ | | | | |
| Заторные явления | | | | | |
| Модель | $F = 496 \times \ln(Q) - 4436$ | | | | |
| Дешифрирование | $F = 418 \times \ln(Q) - 3632$ | | | | |

Однако отдельного внимания заслуживают ситуации с экстремально высокими расходами воды, для которых данные дистанционных наблюдений отсутствуют. Для этой цели помимо точек, соответствующих датам, за которые дешифрировались космические снимки, на график нанесены зависимости, полученные по результатам численных экспериментов с гидродинамической моделью, в ходе которых проводилось моделирование затопления при расходах воды р. Лены в диапазоне от $5000 \text{ до } 55\ 000\ \text{м}^3/\text{с}$ шагом $2500 \text{ м}^3/\text{c}$ ($5000, 7500, 10\ 000\ \text{м}^3/\text{c}$ и т.д.).

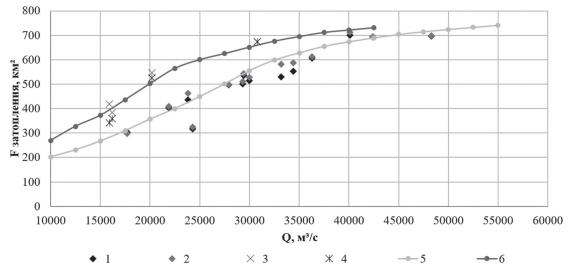


Рис. 4. График зависимости площади затопления от расхода воды. В легенде цифрами обозначена площадь затопления по результатам: 1 — дешифрирования; 2 — моделирования; 3 — дешифрирования в период заторных явлений; 4 — моделирования в период заторных явлений; 5 — численных экспериментов; 6 — численных экспериментов в случае заторов

Отклонения точек, смоделированных по фактически наблюдавшимся ситуациям, от кривой, полученной на основе численных экспериментов, обусловлено тем, что при моделировании реально наблюдённых половодий и паводков расчёт проводился с учётом гидрографа конкретного половодья или паводка, в то время как моделирование площадей затопления на основе численных экспериментов — при счёте «до установления» (моделировалось прохождение постоянного расхода воды до тех пор, пока переставали меняться все гидравлические характеристики потока, время установления составляло 4 суток). Примером является ситуация от 13 мая 2013 г., когда был зафиксирован расход, равный $24300 \text{ м}^3/\text{с}$. В данный день наблюдалось резкое увеличение расхода воды и последующий спад, и затопление оказалось существенно ниже (на 34 %), чем по результатам моделирования при постоянном расходе воды. При этом в области расходов воды редкой повторяемости площадь затопления, определённая на основе численных экспериментов, ниже, чем полученная на основе экстраполяции зависимостей, полученных по точкам сопоставления результатов моделирования и дешифрирования. Это связано с тем, что при экстремально высоких расходах воды пониженная часть долины реки уже полностью залита водой и при дальнейшем росте расходов воды площади затопления растут незначительно. Например, при расходе воды 1%-й обеспеченности, равном 55 000 м³/с, по результатам численных экспериментов площадь затопления составляет 741 км², что всего лишь на 6 % превышает наибольшую наблюдавшуюся за исследуемый период площадь затопления при расходе воды 48 300 м³/с. При экстраполяции же зависимостей мы получим оценки площади затопления для расхода 1%-й обеспеченности, на 15 % превышающие наибольшую наблюдавшуюся за период площадь затопления.

В целом полученные зависимости площади затопления от входного расхода воды, определённые независимыми методами, подтверждают корректную калибровку гидродинамической модели для всего диапазона гидрологических ситуаций, включая ледовые заторы. Расхождения между полученными по результатам моделирования и результатам дешифрирования площадями водной поверхности за различные годы в основном не превышают 4—6 %, максимальные различия при открытой воде составляют 10 %, при ледовых заторах достигают 18 %. Данная точность вполне сопоставима как с полученными результатами для отдельных гидрологических ситуаций в других районах исследований в России (Belikov et al., 2015), так и с зарубежным опытом применения других моделей (Domeneghetti et al., 2014).

При сопоставлении результатов численных экспериментов и результатов моделирования прохождения реально наблюдавшихся гидрографов проявляются более существенные различия в диапазоне наблюдавшихся расходов воды (в основном — до 15 %, кроме описанной выше ситуации от 13 мая 2013 г.), поскольку численные эксперименты не учитывают динамику прохождения отдельных половодий и паводков. Однако в области экстремально высоких расходов воды численные эксперименты позволяют получить более обоснованные оценки площади затопления, чем экстраполяция зависимостей площадей затопления от расходов воды, построенных по гидрологическим ситуациям из диапазона наблюдений, так как модель отражает реальную морфометрию долины реки.

Заключение

По итогам исследования получены следующие результаты:

- 1. Проведена дополнительная верификация гидродинамической модели STREAM_2D для участка р. Лены у г. Якутска на основе сопоставления с границами затопления по данным космических снимков для всего диапазона гидрологических ситуаций, при которых происходит затопление пойм, включая ледовые заторы, максимальные расходы половодий и паводки.
- 2. Показано, что наилучшее соответствие площадей затопления (относительная погрешность не превышает 1,5 % (см. *табл. I*)), полученных на основе гидродинамического моделирования и космических снимков, наблюдается при полностью затопленной пойме (при расходах воды более 40 000 м³/с).

- 3. Для уточнения результатов дешифрирования космических снимков при расходах воды, соответствующих началу затопления пойм (25 000—30 000 м³/с), предложено применение маски растительности, учитывающей пространственное распределение полузатопленных кустарников.
- 4. Получено хорошее соответствие зависимостей площадей затопления от расхода воды р. Лены на основе различных методов; относительная ошибка при сопоставлении результатов моделирования реально наблюдавшихся гидрологических ситуаций и дешифрирования космических снимков не превышает 10% в половодья и паводки, и 18% при ледовых заторах. Численные эксперименты обеспечивают несколько более низкую точность в диапазоне реально наблюдавшихся расходов воды (средняя относительная ошибка 7%, максимальная более 30%), однако более надёжны для экстраполяции в область расходов воды редкой повторяемости, так как модель учитывает реальную морфометрию речной долины.
- 5. Исследование показало, что космические снимки позволяют провести качественную верификацию гидродинамической модели, при этом точность оценок площадей затопления главном образом зависит не от типа применяемых спутниковых данных, а от гидрологической обстановки, которая количественно выражается расходом воды, а также наличием или отсутствием ледовых явлений.

Авторы статьи выражают глубокую признательность лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ за предоставленные материалы полевых исследований, ГК «СКАНЭКС» — за материалы дистанционного зондирования. Численные эксперименты по оценке площадей затопления выполнены при поддержке проекта РНФ 14-17-00155, моделирование динамики половодий и паводков — при поддержке проекта РФФИ 17-05-01230.

Литература

- 1. *Айбулатов Д. Н.*, *Зотов Л. В.*, *Фролова Н. Л.*, *Чалов С. Р.* Современные возможности использования методов дистанционного зондирования для получения информации о водных объектах // Земля из космоса наиболее эффективные решения. 2015. Спецвып. С. 34—37.
- 2. Барышников Н. Б. Гидравлические сопротивления речных русел. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2003. 147 с.
- 3. *Беликов В. В.*, *Семенов А. Ю*. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды // Журн. вычислительной математики и математической физики. 1997. Т. 37. № 8. С. 1006—1019.
- 4. *Беликов В. В., Кочетков В. В.* Программный комплекс STREAM_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612181. Рег. 20.02.2014.
- 5. *Зайцев А.А.*, *Чалов Р.С.* Русловые процессы и регулирование русла р. Лена в районе г. Якутска // Водные ресурсы. 1989. № 5. С. 75—81.
- 6. *Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В.* Аэрокосмические методы географических исследований: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «География» и специальностям «География» и «Картография». М.: Академия, 2011. 416 с.
- 7. *Крыленко И. Н.* Опыт применения космических снимков для компьютерного моделирования затопления территории при наводнениях на реках // 2-я Международная конф. «Земля из космоса наиболее эффективные решения»: сб. тез. конф. М.: Изд-во Бином, 2005. С. 104—106.
- 8. *Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А.* Численные методы в задачах речной гидравлики. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.
- 9. *Чалов Р. С.*, *Кирик О. М.*, *Ильясов А. К.*, *Ботавин Д. В.* Якутский водный узел на р. Лене: проблемы русловых процессов, история, современность, перспективы, возможности управления // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 3. С. 44—56.
- 10. *Чалов Р. С.*, *Завадский А. С.*, *Рулева С.* Н., *Кирик О. М.*, *Прокопьев В. П.*, *Андросов И. М.*, *Сахаров А. И.* Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22—35.

- 11. *Belikov V. V.*, *Krylenko I. N.*, *Alabyan A. M.*, *Sazonov A. A.*, *Glotko A. V.* Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers // Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities: Proc. IAHS. 2015. V. 370. P. 69–74.
- 12. Domeneghetti A., Tarpanelli A., Brocca L., Barbetta S., Moramarco T., Castellarin A., Brath A. The use of remote sensing-derived water surface data for hydraulic model calibration // Remote Sensing of Environment. 2014. No. 149. P. 130–141.
- 13. *Kanungo T., Mount D. M., Netanyahu N., Piatko C., Silverman R., Wu A. Y.* An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. No. 24. P. 881–892.
- 14. Zaitsev A.A., Belikov V.V., Militeev A.N. Using computer modeling for regulation of sediment transport under hydraulic structures on a large river // Sediment Transfer through the Fluvial System: Proc. Intern. Symp. 2004. P. 386–394.

Verification of the two-dimensional hydrodynamic model of the Lena River near Yakutsk by time-varying satellite data

E. D. Kornilova¹, I. N. Krylenko^{1,2}, P. P. Golovlyov¹, A. A. Sazonov^{1,2}, A. N. Nikitsky³

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com
 Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia
 GK SCANEX, Moscow 108811, Russia

The article is devoted to the study of areas and flooding boundaries using methods of hydrodynamic modeling, remote sensing data and GIS-technologies. The area of the Lena River near Yakutsk (75 km) was chosen as the study object. Hydrodynamic modeling was carried out using the software package Stream_2D (Belikov, Kochetkov, 2014), which is based on solving the two-dimensional equations of Saint-Venant. The interpretation of satellite images was held in the software package ERDAS Imagine using an automated classification of k-means, which is based on the methods of cluster analysis. As a result, the dependencies of flooding areas, determined on the basis of two independent methods, were constructed on water discharge. Thus, remote sensing data allow conducting a qualitative verification of the hydrodynamic model, and the accuracy of estimates of flooding areas mainly depends not on the type of used satellite images, but on the hydrological situation, which is expressed quantitatively by water discharge, and the presence or absence of ice phenomena.

Keywords: modeling, hydrodynamic model, remote sensing data, flooding, floodplain, spatial images, hydrology, Lena, Yakutsk, ice congestion

Accepted: 30.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178

References

- 1. Aibulatov D. N., Zotov L. V., Frolova N. L., Chalov S. R., Sovremennye vozmozhnosti ispol'zovaniya metodov distantsionnogo zondirovaniya dlya polucheniya informatsii o vodnykh ob"ektakh (Modern possibilities of using remote sensing methods for obtaining information about water bodies), *Zemlya iz kosmosa*, *naibolee effektivnye resheniya*, 2015, No. S, pp. 34–37.
- 2. Baryshnikov N.B., *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel* (Hydraulic resistances of river beds), St. Petersburg: RGGMU, 2003, 147 p.
- 3. Belikov V.V., Semenov A.Yu., Chislennyi metod raspada razryva dlya resheniya uravnenii teorii melkoi vody (The numerical method of disintegration of a discontinuity for solving the equations of the theory of shallow water), *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1997, Vol. 37, No. 8, pp. 1006–1019.

- 4. Belikov V. V., Kochetkov V. V., *Programmnyi kompleks STREAM_2D dlya rascheta techenii, deformatsii dna i perenosa zagryaznenii v otkrytykh potokakh* (Mathematical modeling of complex sections of channels of large rivers The program complex STREAM_2D for the calculation of currents, deformations of the bottom and transport of contaminants in open streams), Certificate of state registration of software No. 2014612181 (RU), Reg. 20.02.2014.
- 5. Zaitsev A.A., Chalov R.S., Ruslovye protsessy i regulirovanie rusla r. Lena v raione g. Yakutska (Channel processes and regulation of the riverbed of the Lena River near Yakutsk), *Vodnye resursy*, 1989, No. 5, pp. 75–81.
- 6. Knizhnikov Yu. F., Kravtsova V. I., Tutubalina O. V., *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovanii* (Aerospace methods of geographical research), Moscow: Akademiya, 2011, 416 p.
- 7. Krylenko I. N., Opyt primeneniya kosmicheskikh snimkov dlya komp'yuternogo modelirovaniya zatopleniya territorii pri navodneniyakh na rekakh (Experience in applying space images for computer modeling of flooding in flooding on rivers), 2-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Zemlya iz kosmosa naibolee effektivnye resheniya" (2nd Intern. Conf. "Earth from space the most effective solutions"), Book of Abstracts, Moscow, 2005, pp. 104–106.
- 8. Kyunzh Zh.A., Kholli F. M., Vervei A., *Chislennye metody v zadachakh rechnoi gidravliki* (Numerical methods in problems of river hydraulics), Moscow: Energoatomizdat, 1985, 255 p.
- 9. Chalov R. S., Kirik O. M., Iliasov A. K., Botavin D. V., Yakutskiy vodnyy uzel na r. Lene: problemy ruslovykh protsessov, istoriya, sovremennost, perspektivy, vozmozhnosti upravleniya (Yakutsk water node on the Lena River: problems of channel processes, history, modernity, prospects, management capabilities), *Vodnove khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2012, No. 3, pp. 44–56.
- 10. Chalov R. S., Zavadskii A. S., Ruleva S. N., Kirik O. M., Prokopyev V. P., Androsov I. M., Sakharov A. I., Morfologiya, deformatsii, vremennye izmeneniya rusla r. Leny i ikh vliyanie na khozyaistvennuyu infrastrukturu v raione g. Yakutska (Morphology, deformations, temporary changes in the Lena riverbed and their impact on the economic infrastructure in the Yakutsk area), *Geomorfologiya*, 2016, No. 3, pp. 22–35.
- 11. Belikov V. V., Krylenko I. N., Alabyan A. M., Sazonov A. A., Glotko A. V., Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of russian rivers, *Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities*, Proc. IAHS, 2015, Vol. 370, pp. 69–74.
- 12. Domeneghetti A., Tarpanelli A., Brocca L., Barbetta S., Moramarco T., Castellarin A., Brath A., The use of remote sensing-derived water surface data for hydraulic model calibration, *Remote Sensing of Environment*, 2014, No. 149, pp. 130–141.
- 13. Kanungo T., Mount D. M., Netanyahu N., Piatko C., Silverman R., Wu A. Y., An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, No. 24, pp. 881–892.
- 14. Zaitsev A.A., Belikov V.V., Militeev A.N., Using computer modeling for regulation of sediment transport under hydraulic structures on a large river, *Sediment Transfer through the Fluvial System*, Proc. Intern. Symp., Moscow, 2004, pp. 386–394.