Выявление и оценка площади русловых деформаций, произошедших за 30 лет на реке Амур на участке от села Екатерино-Никольское до Хабаровска

Ю. А. Амелеченко, З. Н. Лотарева

*Дальневосточный Центр «Научно-исследовательский центр
космической гидрометеорологии «Планета», Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: ovp2@dvrspod.ru*

В работе исследуются русловые деформации, произошедшие в среднем течении реки Амур на участке от села Екатерино-Никольское до города Хабаровска за последние 30 лет, и оценке их площади. Было произведено выделение русла реки Амур на спутниковых снимках ИСЗ серии Landsat и сравнение контуров русел за разные годы с целью выявления деформаций, а также последующая оценка этих изменений. Для выделения русла реки применялись методы определения многоканальных спектральных индексов с использованием дерева решения. Для получения максимальной достоверности результаты корректировались оператором. В результате обработки были сформированы цветосинтезированные изображения, представляющие собой комбинацию спутникового снимка и полученных контуров русел с нанесением актуальных данных фактических наблюдений на гидрологических постах. Произведён подсчёт площадей выявленных русловых деформаций, сравнение полученных результатов и анализ возможных причин изменений. Для участков с максимальными изменениями подобраны цветосинтезированные спутниковые снимки, содержащие информацию о произведённых со стороны КНР и РФ берегоукрепительных работах. Полученные результаты важны для выявления морфометрических изменений на участках неустойчивого русла реки Амур, вызванных выраженной динамикой смещения фарватера на пограничных участках реки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, река Амур, сток, берег, русловые деформации, оценка площади изменений

Одобрена к печати: 17.05.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-193-205

Введение

В настоящее время Амур — одна из самых длинных рек планеты. Амур является десятой по водности среди рек мира и четвертой по этому показателю в России. Русло реки подвержено постоянным изменениям вследствие естественных причин и максимально преобразуется во время масштабных паводков, таких как катастрофическое наводнение 2013 г., когда под водой оказалось свыше 13,5 тыс. домов с населением более 100 тыс. человек, а общий ущерб от стихии составил порядка 40 млрд рублей.

Изменение распределения потока воды между рукавами реки Амур может привести к переносу российско-китайской границы. В результате деформации речного русла крупные острова, в настоящее время относящиеся к территории России, могут перейти КНР. Поэтому исследование вопроса о деформациях русла Амура, вызванных выраженной динамикой смещения фарватера на пограничных участках реки, имеет большую практическую ценность для проведения Государственного мониторинга водных объектов РФ в рамках совместного Российско-Китайского мониторинга.

Деформации русла также могут привести и к менее глобальным последствиям. Например, из-за отклонения русла реки от Хабаровска вероятно возникновение проблем с забором воды для города, судоходством, стабилизацией опор моста через Амур, являющегося частью Транссибирской магистрали, и др.

Определение таких изменений может осуществляться как наземными наблюдениями, так и посредством дистанционного метода — космической съёмкой, что позволяет существенно сократить исследовательские расходы.

Цель настоящей работы заключается в выявлении изменений в среднем течении русла реки Амур на участке от села Екатерино-Никольское до города Хабаровска, а также проведении оценки русловых деформаций по спутниковым данным.

Для реализации этой цели в работе ставились следующие задачи:

1. Подбор, анализ и предварительная обработка ретроспективных космических снимков ИСЗ серии Landsat.
2. Выделение русла реки Амур на спутниковых снимках.
3. Сравнение выделенного русла реки Амур за разные годы с целью выявления деформаций.
4. Оценка площадей выявленных изменений.
5. Анализ полученных результатов и возможных причин русловых деформаций.

1. Объект исследования

Река Амур образуется при слиянии рек Шилка и Аргунь, протекает по территории Амурской области, Еврейской автономной области, Хабаровскому краю и впадает в Амурский лиман Охотского моря. Длина реки — 2824 км, объём годового стока — 359,51 км³, средняя скорость течения — около 5 км/ч, площадь водосборного бассейна составляет 1 855 000 км².

По особенностям долины река разделяется на три основных участка: верхний Амур — от истока до устья реки Зея; средний Амур — от устья реки Зея до устья реки Уссури включительно и нижний Амур — от устья реки Уссури до впадения в Амурский лиман.

В настоящей статье будет рассмотрен участок среднего Амура — промежуток от Благовещенска до Хабаровска около 1000 км в длину. Скорость течения среднего Амура составляет до 5,5 км/ч. В среднем течении в Амур впадают крупнейшие притоки: реки Зея, Буряя, Сунгари и Уссури, формирующие основной амурский сток (около 65 %).

Ниже впадения многоводной реки Зеи Амур существенно расширяется, начинается плоская, широкая и местами заболоченная Зейско-Буреинская равнина, где Амур принимает равнинный характер. Здесь река распадается на многочисленные рукава, разделённые островами и мелкими островками, течение замедляется. Резкое сужение долины происходит, когда Амур прорезает отроги хребта Малый Хинган и почти 150 км течёт единым мощным потоком в узкой каньонообразной долине. Далее Амур выходит на просторы Средне-Амурской низменности, где в него впадает один из крупнейших притоков — река Сунгари, и снова трансформируется в реку равнинного типа с низкими, часто заболоченными берегами.

Протекая по Зейско-Буреинской равнине и Средне-Амурской низменности, Амур испытывает медленную глубинную эрозию в пределах широкой террасированной долины. Русло реки слабоизвилистое, местами меандрирующее, на большей части с чётко выраженной русловой и пойменной многоруканностью. От впадения реки Сунгари и ниже по течению русло определяется современной направленной аккумуляцией, здесь река попеременно сужается и расширяется в соответствии с геологическим строением территории (Муранов, 1970).

На исследуемом участке отмечается повышенная активность горизонтальных деформаций русла и формирование молодой поймы: образование ряда внутренних дельт, зарастание кос, оседание наносов реки, образование и размыв островов и осерёдков, перераспределение стока воды между рукавами. Изредка на крупных рукавах образуются характерные для широкопойменных русел прорванные излучины, что соответствует процессу незавершённого меандрирования (Наумов, 2012).

Важно отметить, что в маловодный период этот процесс идёт достаточно долго и занимает десятки лет, а во время наводнений изменения происходят более динамично.

В многолетнем режиме водного стока Амура отчётливо выражено чередование периодов пониженной и повышенной водности, каждый продолжительностью 10–15 лет.

Несмотря на отсутствие гидротехнических сооружений непосредственно на Амуре, существенное влияние на водный режим реки оказывают гидроэлектростанции, расположенные

на его крупнейших притоках: Зейская, Бурейская и Фынманская (на реке Сунгари). Зимой зарегулированные притоки поставляют до 90 % стока в реку Амур, что провоцирует мощные эрозионные процессы в развивающихся протоках многорукавных русел (Ким, 2005).

Суммируя все вышеперечисленное, можно сказать, что река Амур подвергается воздействию разнообразных факторов, способствующих перераспределению стока воды между рукавами, формированию островов и осерёдков, размыву берегов и другим русловым деформациям.

2. Отбор и подготовка данных для анализа

Основным требованием к исходной спутниковой информации для анализа изменений, произошедших в среднем течении русла реки Амур на участке от села Екатерино-Никольское до города Хабаровска, являлось наличие унифицированных данных долговременных наблюдений с максимально возможным разрешением. Наиболее подходящей системой, отвечающей этому требованию, является система спутников серии Landsat, данные которой находятся в свободном доступе.

Учитывая тот факт, что на разных спутниках Landsat функционировало неодинаковое по характеристикам оборудование, была проведена унификация данных, которая позволила получать многоспектральные изображения и производить математические операции с разными каналами спутниковой съёмки.

В работе использовались следующие съёмочные системы спутников серии Landsat:

1. Тематический сканер ТМ (Landsat-5), данные которого имеют характеристики: пространственный охват 185 на 705 км и пространственное разрешение 30 м.
2. Сенсор OLI (Operational Land Imager) (Landsat-8), обеспечивающий съёмку в девяти диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излучения (ИК): в восьми каналах с разрешением 30 м и одновременную панхроматическую съёмку с разрешением 15 м при ширине полосы обзора для всех каналов около 185 км.

В первую очередь был составлен список дат за период с конца апреля по конец октября, когда на русле не наблюдалось облачности. Поскольку в результате работы требовалось выделить произошедшие с руслом изменения, необходимо было сравнить между собой несколько снимков за разные годы. При этом важно, чтобы не было существенных различий в уровне воды на сопоставляемом участке. В качестве источника данных об уровнях воды использовался государственный водный кадастр по бассейну реки Амур, составленный в Дальневосточном УГМС.

Очевидно, что нет необходимости сравнивать все годы между собой, поэтому было решено руководствоваться следующими идеями:

1. Сравнить спутниковые снимки за самую раннюю и самую позднюю из доступных дат со схожими уровнями воды, например 1985 и 2015 гг., чтобы наглядно увидеть произошедшие с руслом реки изменения за последние 30 лет.
2. Сравнить снимки, сделанные до какого-либо масштабного наводнения и после него, с целью оценки влияния паводков на русловые деформации.
3. Сравнить снимки, снятые в период малой водности, максимально разнесённые во времени, чтобы сопоставить величину полученных изменений с изменениями в период повышенной водности из пункта 2.

На участке от села Екатерино-Никольское до города Хабаровска отбор данных производился по информации со следующих гидрологических постов: Екатерино-Никольское, Нагибово, Ленинск, Нижнеспасское, Хабаровск, Казакевичево. Для имеющегося списка дат была составлена таблица уровней воды (Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши Российской Федерации. Хабаровск, 1985–2005 и 2006–2015 гг.) были составлены таблицы уровней воды по гидропостам, на основании которых осуществлялся дальнейший отбор.

Поскольку подобрать даты, за которые уровни Амура для каждого из шести гидропостов максимально схожи, по всему исследуемому участку невозможно, было решено разбить его на три фрагмента:

- 1) фрагмент № 1 — от поста Екатерино-Никольское до впадения в Амур реки Сунгари, включающий посты Екатерино-Никольское и Нагибово;
- 2) фрагмент № 2 — от впадения в Амур реки Сунгари до поста Нижнеспасское, включающий гидропост Ленинск;
- 3) фрагмент № 3 — включает Амуро-Уссурийский водный узел и посты Нижнеспасское, Хабаровск, Казакевичево.

Дальнейший поиск пригодных для сравнения данных производился по вышеуказанным фрагментам. Например, для фрагмента № 3 были попарно отобраны даты с минимальным расхождением уровней воды одновременно по всем трём указанным постам. Важно заметить, что поиск пар изображений со схожими уровнями по фрагменту № 2, где поиск пар проводился по одному гидрологическому посту, не вызвал сложностей, в отличие от фрагмента № 3, где сравнение проводилось сразу по трём постам и существенно затруднилось влиянием реки Уссури (пост Казакевичево) со своим, отличным от Амура, гидрологическим режимом.

Масштабные наводнения за исследуемый период (с 1984 г. по настоящее время) наблюдались в 1991, 1998, 2009 и 2013 гг., поэтому для каждого наводнения на каждом участке для последующего сравнения были отобраны даты «до» и «после», для которых выполнялись следующие условия:

- 1) минимальная разница в уровнях для каждого гидрологического поста на каждом классифицируемом участке;
- 2) отсутствие различных ледовых явлений на русле и протоках, затрудняющих дешифрирование границы между водой и сушей;
- 3) минимальное наличие или отсутствие облачного покрова непосредственно на русле реки.

В исследуемый в работе период пониженная водность наблюдалась в 2006–2008 гг., за которые также были отобраны данные, отвечающие вышеприведённым критериям.

3. Методика классификации

Самыми распространёнными методами для дистанционного изучения водных объектов по мультиспектральным спутниковым снимкам являются:

1. Определение водных спектральных индексов.
2. Тематическая классификация с обучающей выборкой.
3. Классификация с использованием пороговых значений.

Для наилучшего результата также применяется сочетание этих методов. Ручное дешифрирование не получило широкого распространения в силу очень высоких трудозатрат.

На практике для выделения границы «вода — суша» наиболее распространено использование многоканальных спектральных индексов в силу их простоты и наименьших вычислительных затрат.

Основными факторами, затрудняющими выделение этой границы, оказываются следующие:

- 1) некорректность классификации с использованием многоканальных индексов для небольшой толщины водного слоя и узких протоков;
- 2) загрязнение вод взвешенными веществами (илом, песком, глиной), что меняет спектральные характеристики воды;
- 3) наличие водной растительности на поверхности водоёмов.

При сравнении результатов выделения береговой линии с помощью различных индексов с наиболее достоверным эталоном, в качестве которого использовалось дешифрирование границы «вода — суша» вручную, рабочим методом идентификации водных объектов на спутниковом изображении ИСЗ Landsat была выбрана классификация снимка посредством программного комплекса ENVI с использованием метода дерева принятия решений. В качестве узлов проверки использовалась комбинация спектральных индексов и пороговых значений данных.

В автоматической классификации границы «вода — суша» в ходе работы использовались следующие многоспектральные индексы: нормализованный разностный водный индекс NDWI, модифицированный нормализованный разностный водный индекс MNDWI и автоматизированный индекс выделения вод AWEI. Использование сразу нескольких индексов оправдано тем, что у каждого из них имеются свои недостатки. (Курганович, Носкова, 2015).

Поскольку цель работы — выявление всех деталей русловых деформаций реки Амур, приоритетным критерием является максимальная достоверность определения границы раздела суши и воды, в том числе и неглубокой, для чего авторами была произведена тематическая корректировка результатов полученной ранее автоматической классификации.

В ходе проделанной работы были выполнены классификации за каждую выбранную дату, которые попарно сопоставлены между собой с целью выявления произошедших за период изменений.

В результате были сформированы цветосинтезированные изображения, представляющие собой комбинацию спутниковых снимков и полученной классификации с нанесением актуальных данных фактических наблюдений на гидрологических постах.

На *рис. 1* представлен пример полученных в результате обработки данных. Синим цветом обозначена та часть реки, которая присутствовала и в 1985, и в 2015 г., т. е. не изменилась. Красным цветом на рисунке отмечены старицы (участки прежнего русла реки), т. е. та часть реки, которая была в 1985 г., но в 2015 г. воды в этом месте больше нет. Голубой цвет, напротив, указывает новое русло и протоки, где воды в 1985 г. не было и куда к 2015 г. она прибыла.

Рис. 1. Сравнение русла реки Амур за 1985 и 2015 гг.

4. Оценка площадей изменения русла

На следующем этапе работы был произведён подсчёт площадей изменения русла реки Амур в соответствии с идеями, описанными в разделе 2.

В *табл. 1* приведены результаты расчёта площадей изменений русла на участке от гидропоста Екатерино-Никольское до впадения в Амур реки Сунгари. На диаграмме (*рис. 2*, см. с. 199) представлена сравнительная динамика площадей изменений русла на указанном участке.

В *табл. 2* приведены результаты расчёта площадей изменений русла на участке от впадения в Амур реки Сунгари до поста Нижнеспасское. На диаграмме (*рис. 3*, см. с. 199) представлена сравнительная динамика площадей изменений русла на указанном участке.

Таблица 1. Значения рассчитанных площадей изменений русла на участке от гидропоста Екатерино-Никольское до впадения в Амур реки Сунгари

Период сравнения, гг.	Площадь намыва		Площадь размыва		Общая площадь изменений
	Количество пикселей	Площадь, км ²	Количество пикселей	Площадь, км ²	
1986–2014	12 422	11,18	24 306	21,88	33,06
1988–1992	6246	5,62	3298	2,97	8,59
1996–2001	10 117	9,11	4270	3,84	12,95
2006–2008	64 598	58,14	925	0,83	58,97
2007–2010	2579	2,32	11 204	10,08	12,40
2011–2015	2821	2,54	16044	14,44	16,98

Таблица 2. Значения рассчитанных площадей изменений русла на участке от впадения в Амур реки Сунгари до поста Нижнеспасское

Период сравнения, гг.	Площадь намыва		Площадь размыва		Общая площадь изменений
	Количество пикселей	Площадь, км ²	Количество пикселей	Площадь, км ²	
1985–2015	47 532	42,78	42 385	38,15	80,93
1987–1992	24 629	22,17	27 394	24,65	46,82
1998–1999	10 927	9,83	20 146	18,13	27,96
2006–2008	9955	8,96	7752	6,98	15,94
2007–2009	11 452	10,31	7398	6,66	16,97
2010–2015	18 741	16,87	22 468	20,22	37,09

Таблица 3. Значения рассчитанных площадей изменений русла на участке, содержащем Амуро-Уссурийский водный узел и включающем гидрологические посты Нижнеспасское, Хабаровск, Казакевичево

Период сравнения, гг.	Площадь намыва		Площадь размыва		Общая площадь изменений
	Количество пикселей	Площадь, км ²	Количество пикселей	Площадь, км ²	
1985–2014	67 476	60,73	44 333	39,90	100,63
1988–1994	16 571	14,91	15 072	13,56	28,47
1998–2000	15 973	14,38	25 797	23,22	37,6
2006–2008	16 095	14,49	18 425	16,58	31,07
2008–2010	15 356	13,82	21 710	19,54	33,36

В табл. 3 приведены результаты расчёта площадей изменений русла на участке, содержащем Амуро-Уссурийский водный узел и включающем посты Нижнеспасское, Хабаровск, Казакевичево. На диаграмме (рис. 4) представлена сравнительная динамика площадей изменений русла на указанном участке.

Рис. 2. Сравнительная динамика площадей изменений русла на участке от гидропоста Екатерино-Никольское до впадения в Амур реки Сунгари

Рис. 3. Сравнительная динамика площадей изменений русла на участке от впадения в Амур реки Сунгари до поста Нижнеспасское

Рис. 4. Сравнительная динамика площадей изменений русла на участке, содержащем Амуро-Уссурийский водный узел и включающем гидрологические посты Нижнеспасское, Хабаровск, Казакевичево

На основе данных *табл. 1–3* было произведено вычисление средних значений изменения русла реки Амур (в квадратных километрах) для каждого участка. Результаты представлены в *табл. 4*, где столбцы *A* и *C* — средние величины площади образовавшейся части реки; столбцы *B* и *D* — средние величины площади исчезнувшей части реки; *E* — площадь образовавшейся части реки; *F* — площадь исчезнувшей части.

Таблица 4. Сводная таблица средних значений русловых деформаций

Участок реки	Полноводный период		Маловодный период		За весь период исследования	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Участок 1	11,77	5,85	0,83	58,14	22,05	11,18
Участок 2	17,42	14,79	6,98	8,96	38,15	42,78
Участок 3	18,77	14,37	16,58	14,49	39,90	60,73
Средняя площадь изменений за период	15,99	12,58	8,13	27,33	33,36	38,23

5. Анализ результатов

В результате проделанной работы были выявлены существенные изменения в русле реки Амур за период с 1984 г. по настоящее время. В течение многих лет на реке Амур и её притоках наблюдаются процессы русловых деформаций. Размывы берегов — природный процесс, происходящий на любой реке. Интенсивность изменений береговой линии и их расположение зависят от плотности и почвенного состава речной долины, речного стока и характеристик наносов, кривизны изгибов реки и морфодинамического типа русла.

На рассматриваемом участке № 1 от гидрологического поста Екатерино-Никольское до впадения в Амур реки Сунгари в *табл. 1* из общего ряда значительно выбиваются данные за 2006–2008 гг. На *рис. 2* наблюдается существенный скачок площади намыва, в отличие от других исследованных временных промежутков. Эти годы пришлись на период пониженной водности.

Особенностью водного режима рек бассейна Амура летом 2006 г. было формирование в первой половине лета, до начала характерных муссонных дождей, высоких дождевых паводков на мелких реках в верхнем и среднем течении реки Амур.

Для классификации и последующего анализа русла реки Амур на участке № 1 был отобран снимок за 04.07.2006 (*рис. 5*, см. с. 201), сделанный в период после дождевых паводков, влияние которых наглядно отразилось на изображении участками с повышенной влажностью почв и стоянием воды в низинах. Это привело к визуальному увеличению площади реки на снимке.

2008 г. отличался наименьшими уровнями воды на исследуемом участке за весь период наблюдений. Только зимой 2008 г. на промежутке от впадения в Амур реки Бурей до устья Усури за счёт сбросов Бурейской ГЭС уровни воды превышали обычные для этого периода на 0,5–1,0 м. На этом участке вскрытие реки произошло в чрезвычайно ранние сроки — на 10–15 дней раньше нормы и на 3–5 дней раньше самых ранних дат. Уровни воды в конце весны в среднем течении реки Амур в Амурской области и ЕАО были низкими (на 2,0–3,0 м ниже нормы). На большей части бассейна реки Амур выпало всего 20–30 % месячной нормы осадков.

Для классификации и последующего анализа русла реки Амур на участке № 1 был отобран снимок за 23.06.2008 (*рис. 6*, см. с. 201). На конец июня уровни воды на Среднем Амуре были на 2,0–2,8 м ниже обычных, отсутствовали постпаводковые явления и последствия сбросов Зейской и Бурейской ГЭС, соответственно, и русло реки было более узким, чем обычно. Это привело к значительному скачку площади изменений, показанному на *рис. 2*.

Рис. 5. Цветосинтезированное изображение по данным ИСЗ Landsat 04.07.2006 01:54 GMT

Рис. 6. Цветосинтезированное изображение по данным ИСЗ LANDSAT 23.06.2008 01:49 GMT

Особенностью рассматриваемого участка до засушливого промежутка 2006–2008 гг. является преобладание площадей намыва над площадями размыва. После периода пониженной водности эта тенденция меняется на противоположную: значительное превышение площадей размыва над площадями намыва.

Также важно отметить, что лишь малая часть русловых деформаций на участке № 1 выявлена выше по течению относительно гидрологического поста Нагибово, где Амур протекает по восточным отрогам хребта Малый Хинган — здесь ложе реки складывается из трудноразмываемых пород. Далее по течению Амур выходит на Средне-Амурскую низменность и распадается на множество рукавов, разделённых многочисленными островами, течение замедляется. Здесь острова имеют тенденцию к размыву со стороны правого берега и приросту со стороны левого, что объясняется аккумуляцией наносов. Аналогичный процесс происходит и после впадения в Амур реки Сунгари на участках № 2 и № 3. Такая картина определённо указывает на смещение стержня потока к российскому берегу.

На участке № 2 от устья Сунгари до гидрологического поста Нижнеспасское имеет место примерное равенство площадей размыва и аккумуляции, отражающее соотношение берегоукрепительных сооружений по обоим берегам. Несмотря на незначительную разницу протяжённости основного русла реки на участках № 1 и № 2, из *табл. 1* и *2* ясно, что общая площадь изменений за весь исследованный период после впадения в Амур реки Сунгари существенно выше. Это связано как со значительно возросшей водностью, так и с разветвлением русла за счёт увеличения количества островов и протоков, что в сумме даёт более длинную береговую линию, подверженную антропогенным и естественным изменениям. Также с выходом Амура на Средне-Амурскую низменность течение замедляется, а транспортирующая способность реки уменьшается.

Перечисленные выше факторы в равной степени относятся и к участку № 3, содержащему Амуро-Уссурийский водный узел и включающему гидрологические посты Нижнеспасское, Хабаровск, Казакевичево, на котором суммарная площадь деформаций наибольшая.

Рис. 7. Цветосинтезированное изображение по данным КА «Ресурс-П» № 2 07.07.2016 03:30 GMT

Рис. 8. Цветосинтезированное изображение по данным КА «Ресурс-П» № 1 20.09.2016 01:28 GMT

На *рис. 4*, отражающем данные *табл. 3*, можно наблюдать незначительную разницу между общей величиной площадей изменений русла реки в исследованные краткосрочные периоды. Из рисунка также видно, что суммарная величина деформаций за все время намного превышает их среднюю величину за короткие промежутки времени. Можно предположить, что основные изменения русла реки Амур на участке № 3 пришлись на паводок 2013 г. К сожалению, для рассматриваемого фрагмента реки не удалось найти и отклассифицировать данные со схожими для всех трёх гидропостов уровнями относительно катастрофического наводнения, произошедшего в 2013 г.

По данным *табл. 4*, средняя величина русловых деформаций в полноводный период почти в два раза превышает значения за маловодный период. Это даёт основание утверждать, что прохождение паводковых явлений оказывает существенное влияние на пойму, русло, рукава и протоки реки Амур.

Самые значительные изменения береговой линии на исследованной части русла Амура происходят вследствие увеличения кривизны излучин реки, размыва приверха островов и их смещения по течению реки.

На полученных композитных изображениях за самую раннюю и самую позднюю из доступных дат со схожими уровнями воды на участках № 2 и № 3 особенно масштабные изменения наблюдаются на излучинах реки.

Практически на всем протяжении Амура на рассмотренном участке с 2005 г. со стороны КНР проводились активные инженерные работы по укреплению береговой линии, возведено множество бетонных дамб. Это привело к увеличению сечения северных рукавов реки и смещению основного русла, а за ним и фарватера в северном направлении, в сторону более рыхлого и легко размываемого российского берега. Примеры спутниковых снимков высокого разрешения представлены на *рис. 7* и *8* (см. с. 202).

Заключение

В ходе работы был исследован ряд ретроспективных космических снимков КА серии Landsat с 1984 по 2015 г. и обнаружены множественные русловые деформации среднего течения реки Амур на участке от села Екатерино-Никольское до Хабаровска.

Также по снимкам высокого разрешения с ИСЗ серии «Ресурс-П» были подобраны образцы берегоукрепительных сооружений на территории КНР и РФ, включая участок острова Большой Уссурийский.

Всего было скачано 78 архивов с данными ИСЗ Landsat, сгенерировано и отклассифицировано 34 файла, получено 34 вектора русла реки, создано 17 сравнительных композитов за различные периоды, выделены произошедшие в русле изменения и вычислена их площадь.

Полученные результаты наглядно отражают значительные изменения на всём протяжении исследуемого участка реки. Из таблиц и графиков раздела 4 настоящей работы видно, что на участках после слияния Амура и Сунгари величина деформаций повышается более чем в два раза. Здесь Амур становится более полноводным и многорукавным. Также наблюдается следующая зависимость: чем ниже по течению участок, тем больше величина изменений.

У Хабаровска Амур постепенно мелеет, а протоки Бешеная и Пемзенская с каждым годом становятся шире, что наглядно отражено в полученных классификациях.

Попарное сравнение векторов русла реки Амур за разные годы показало, что величина русловых деформаций в полноводный период почти в два раза превышает значения за маловодный период. Особенно способствуют русловым деформациям паводковые явления, свойственные Амуру в конце летнего периода.

Во избежание катастрофических последствий паводков, таких как в 2013 г., существенных переформирований русла реки и миграции фарватера (а с ним — российско-китайской границы) целесообразно проводить регулярный мониторинг на предмет необходимости проведения берегоукрепительных мероприятий левобережья и инженерных работ в русле Амура, призванных поддерживать фарватер в стабильном состоянии.

Оценить в отдельности величины изменений русла Амура, произошедших за исследованный период на российской и китайской территориях, не представляется возможным ввиду отсутствия в распоряжении авторов точного вектора государственной границы на требуемом участке. Работы в этом направлении могут быть предприняты в дальнейшем.

Практическая значимость работы связана с накоплением отчётного материала, содержащего спутниковые изображения с выделенными на них векторами русла реки Амур на участке от села Екатерино-Никольское до Хабаровска за период с 1984 по 2015 г. Кроме того, приведены численные показатели динамики площадей русловых деформаций и снимки высокого разрешения, содержащие детальные изображения проведённых на территории КНР берегоукрепительных работ.

Авторы выражают благодарность начальнику гидрографической партии «Дальневосточное УГМС» В. И. Сальникову за предоставленную информацию об уровнях реки Амур и оказанную в ходе настоящего исследования помощь.

Литература

1. Ким В. И. Влияние антропогенных факторов на гидрологический режим Нижнего Амура: дис. ... канд. геогр. наук (спец. 25.00.36). Хабаровск, 2005. 153 с.
2. Курганович К. А., Носкова Е. В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озёр юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестник ЗабГУ. 2015. № 6(121). С. 16–24.
3. Муранов А. П. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 2. Нижний Амур (от с. Помпеевка до устья). Л.: Гидрометеиздат, 1970. 592 с.
4. Наумов Г. Г. Антропогенные воздействия на русловые процессы на переходах через водотоки: монография. М.: МАДИ, 2012. 105 с.

Identification and area estimation of 30-year Amur riverbed deformations from Ekaterino-Nikolskoye village to Khabarovsk

Iu. A. Amelchenko, Z. N. Lotareva

*Far-Eastern Center "Planeta", Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: ovp2@dvrcpod.ru*

This paper investigates the riverbed deformations occurred in the middle reaches of the Amur River between Ekaterino-Nikolskoye village and Khabarovsk in the past 30 years and estimates areas of these deformations. We perform segmentation of the riverbeds on Landsat images and compare the resulting riverbed masks obtained from images captured in different years. For segmentation of the riverbeds, we use a combination of multichannel spectral indices and a classifier based on the decision tree. The classification results then undergo the stage of verification and possible manual correction by an operator. As a result of the processing, we created color-coded images, each of which represents an overlay of a satellite image and obtained contours of the riverbed, together with actual data of measurements at hydrological posts. We calculated the areas of the deformations, compared the results and analyzed possible causes of the changes. We also picked up high-resolution satellite images for regions with maximal changes demonstrating shore protection works produced by the People's Republic of China and the Russian Federation. The obtained results are important for revealing the morphometric changes on the sections of the unstable riverbed of the Amur River caused by the noticeable dynamics of the fairway shift at the border sections of the river.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, Amur River, effluent, coast, riverbed deformations, estimation of the area of changes

Accepted: 17.05.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-193-205

References

1. Kim V.I., *Vliyanie antropogennykh faktorov na gidrologicheskii rezhim Nizhnego Amura: diss. kand. geogr. nauk* (The influence of anthropogenic factors on the hydrological regime of the Lower Amur. Cand. geogr. sci. thesis), Khabarovsk, 2005, 153 p.
2. Kurganovich K.A., Noskova E.V., *Ispol'zovanie vodnykh indeksov dlya otsenki izmeneniya ploshchadei vodnogo zerkala stepnykh sodovykh ozer yugo-vostoka Zabaikal'ya, po dannym distantsionnogo zondirovaniya* (The estimation of water surface variations of steppe soda lakes in the southeast of Transbaikalie with using of remote sensing indices), *Vestnik ZabGU*, 2015, No. 6(121), pp. 16–24.
3. Muranov A.P., *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 18. Dal'nii Vostok. Vypusk 2. Nizhnii Amur (ot s. Pompeevka do ust'ya)* (Resources of surface waters of the USSR. Vol. 18. Far East. Issue 2. Lower Amur (from the village of Pompeyevka to the estuary)), Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1970, 592 p.
4. Naumov G.G., *Antropogennye vozdeistviya na ruslovyie protsessy na perekhodakh cherez vodotoki, Monografiya* (Anthropogenic impacts on channel processes on transitions through watercourses, Monograph), Moscow: MADI, 2012, 105 p.