

Метод определения береговых линий водных объектов на основе обработки данных дистанционного зондирования Landsat ETM+

А. С. Тертычная, К. С. Тертычный, А. В. Хоперсков

*Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Россия
E-mail: khoperskov@volsu.ru*

Проблема определения береговых линий является важной для различных гидрологических, экологических, геофизических исследований. Сложная система водоёмов разных размеров, особенно на территории крупных пойм при наличии растительных массивов и заболоченных зон, требует специальных подходов для выделения границ водоёмов. Многоканальные спутниковые данные, включающие инфракрасные диапазоны, позволяют достаточно надёжно выделять водные объекты. Рассматривается эффективность построения береговых линий на основе анализа пространственных данных для двух инфракрасных диапазонов (каналы 4 и 5) Landsat ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus). Создано программное обеспечение для выделения водных объектов по двухканальным инфракрасным изображениям. Алгоритм тестируется на примере Волго-Ахтубинской поймы, которая содержит, помимо таких крупных рек, как Волга и Ахтуба, также сложную мелкомасштабную систему водоёмов: как узких каналов (ериков), так и озёр различных размеров и глубин. Для территории северной части Волго-Ахтубинской поймы критические значения интенсивностей радиации, позволяющие выделять береговые линии на всём изображении, равны 40 и 42 для каналов 4 и 5 соответственно. Проведён анализ погрешностей выделения водных объектов при варьировании критических значений интенсивностей радиации.

Ключевые слова: спутниковые данные, ближний инфракрасный диапазон, водные объекты, границы водоёмов, Волго-Ахтубинская пойма

Одобрена к печати: 25.08.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-28-38

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся основным источником информации о крупномасштабном состоянии земной поверхности по мере повышения пространственного разрешения изображений и расширения диапазона излучения, используемого для съёмки (Полищук и др., 2021; Шинкаренко и др., 2022; Klemas, 2001; Markham, Helder, 2012; Singh, Vyas, 2022). Пятидесятилетняя история спутниковых спектральных исследований поверхности Земли, начиная с Landsat-1 в 1972 г., позволила получить огромный набор эффективных алгоритмов обработки данных и соответствующего программного обеспечения. Важным является наличие инфракрасной части спектра, позволяющей изучать распределение влаги (Matongera et al., 2021; Rivera-Marin et al., 2022). Температурные каналы космоснимков необходимы для построения пространственного распределения температуры после радиометрической калибровки снимков и компенсации влияния оптической плотности с использованием данных об излучательной способности различных участков поверхности Земли.

Глобальное потепление, различные сложные геофизические процессы (эрозия, транспорт и отложение наносов при затоплениях), антропогенные воздействия ответственны за изменения береговых линий водных объектов (Стерлядкин и др., 2022). Их отслеживание в режиме реального времени для очень протяжённых объектов может быть обеспечено только методами обработки данных ДЗЗ (Гинзбург и др., 2022; Полищук и др., 2021; Шинкаренко и др., 2019; Abou Samra, Ali, 2021; Bishop-Taylor et al., 2021). Особенно быстрые морфологические изменения ландшафта происходят в равнинных поймах и дельтах из-за меандрирования речных русел (Кравцова и др., 2022; Beale et al., 2022; Brown et al., 2018). Мощные весенние па-

водки способны существенно изменять гидрологическую структуру поймы за несколько дней (Кликунова и др., 2021; Hauer et al., 2021).

Мониторинг береговых линий на основе ДЗЗ решает самые различные задачи гидрологии, экологии и использования территорий в народном хозяйстве (Бычков и др., 2022; Гинзбург и др., 2022; Kuz'mina et al., 2019; Shinkarenko et al., 2019). Ландшафт пойменных территорий подвержен быстрым трансформациям, и система береговых линий является ярким маркером таких изменений. Протяжённые сложные лесные массивы существенно усложняют любую обработку спутниковых высотных данных (Polidori et al., 2022). Поэтому такие экваториальные территории, как Амазония и бассейн р. Конго, являются сложными для определения границ водоёмов при наличии мощных многоярусных лесных массивов, хорошо маскирующих земную поверхность.

Цель работы заключается в разработке метода построения цифровых береговых линий различного рода водоёмов, как речного типа, так и с неподвижной водой (пруды, водохранилища, озёра), на основе многоканальных данных дистанционного зондирования Landsat ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus). Такие наборы береговых границ, полученные в условиях паводков, определяют постоянные уровни высоты рельефа, позволяя улучшать качество цифровой модели рельефа, что необходимо для решения различных задач динамики поверхностных вод (Isaeva et al., 2022; Khrapov, Khoperskov, 2020).

Материалы и методы

Мы используем наборы мультиспектральных снимков спутников Landsat-7 ETM+ по данным Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) GloVis (*англ.* Global Visualization Viewer). Семь спектральных полос данных ETM+ позволяют различать особенности земной поверхности посредством обработки спектральных сигнатур, поскольку каждый материал имеет характерные спектральные зависимости интенсивностей излучаемой и отражённой радиации (Markham, Helder, 2012; Zhao, Zhu, 2022). Соответствующая спектральная кривая является диагностической для объекта или класса объектов. Для выделения водных объектов и зон с большим содержанием влаги основное значение имеют диапазоны ближнего инфракрасного излучения с длиной волны $\lambda^{(4b)} = 0,775\text{--}0,9$ мкм (4-й канал) и $\lambda^{(5b)} = 1,55\text{--}1,75$ мкм (5-й канал) для Landsat-7 ETM+.

Водные объекты на снимках соответствующих сигнатур должны быть значительно темнее и хорошо контрастировать с другими часто встречающимися видами поверхности. Мы разработали программное обеспечение CoastLineMapAnalyzer на языке Java с использованием пакетов `javax.imageio`, `Abstract Window Toolkit`, `Runnable interface`, `Spring Framework` для создания серверной части приложения. Клиентское приложение отправляет запрос в модуль `New Data Controller`, в котором содержится сгенерированный идентификатор пакета данных для обработки. Вычислительный модуль производит обработку данных из очереди в соответствии с концепцией FIFO (*англ.* First-In, First-Out), в один момент времени в обработке находится только один комплект данных. Это обеспечивает максимальную скорость обработки каждого конкретного пакета, которая происходит в многопоточном режиме, обеспечивая эффективность распараллеливания.

Базовой областью нашего анализа является северная часть Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) с приблизительной площадью 2000 км^2 (см. рис. 1 в работе И. Исaeвой с соавторами (Isaeva et al., 2022)), отличительной особенностью которой являются маленькие перепады высот с типичной абсолютной высотой в восточной части порядка -15 м и до 0 м в западной части. Равнинный характер местности улучшает качество исследований на основе многоканальных снимков в отличие от горной территории, где растительность и солнечная радиация в условиях сложной топографии на малых пространственных шкалах оказывают негативное влияние на точность измерений.

Рисунок 1 показывает переход от двухканального изображения (территория Волго-Ахтубинской поймы, примыкающая к левому берегу р. Волги напротив г. Волгограда, где хорошо

виден крупный о. Сарпинка) к карте водоёмов. Поскольку итоговая карта водоёмов бинарная (см. справа на *рис. 1*), автоматическая векторизация границ водных объектов (береговых линий) является простой операцией. Для каждого из каналов (4-й и 5-й) имеем соответствующие пространственные матрицы интенсивности: $A_{xy}^{(4b)}$ и $A_{xy}^{(5b)}$ (нижние индексы обозначают координаты точки (x, y) с шагом h). Слева приведено RGB-изображение (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий), построенное по данным только 4-го и 5-го каналов: 4-й канал определяет интенсивность красного цвета (R), 5-й канал даёт вклад в зелёный цвет (G). Интенсивность синего цвета (B) равна 0 до обработки изображения. Итоговое изображение водоёмов после обработки определяется цветом B в бинарном виде для каждого пикселя: $B = 0$ — воды нет, $B = 255$ — вода есть. На этапе обработки проводится перебор по всем пикселям с проверкой условий:

$$A_{xy}^{(4b)} < A_{crit}^{(4b)}, \quad A_{xy}^{(5b)} < A_{crit}^{(5b)} \Rightarrow B = 255, \tag{1}$$

где $A_{crit}^{(4b)}$, $A_{crit}^{(5b)}$ — критические значения интенсивности излучения для 4-го и 5-го каналов соответственно. Если условия (1) одновременно не выполняются, то $B = 0$.

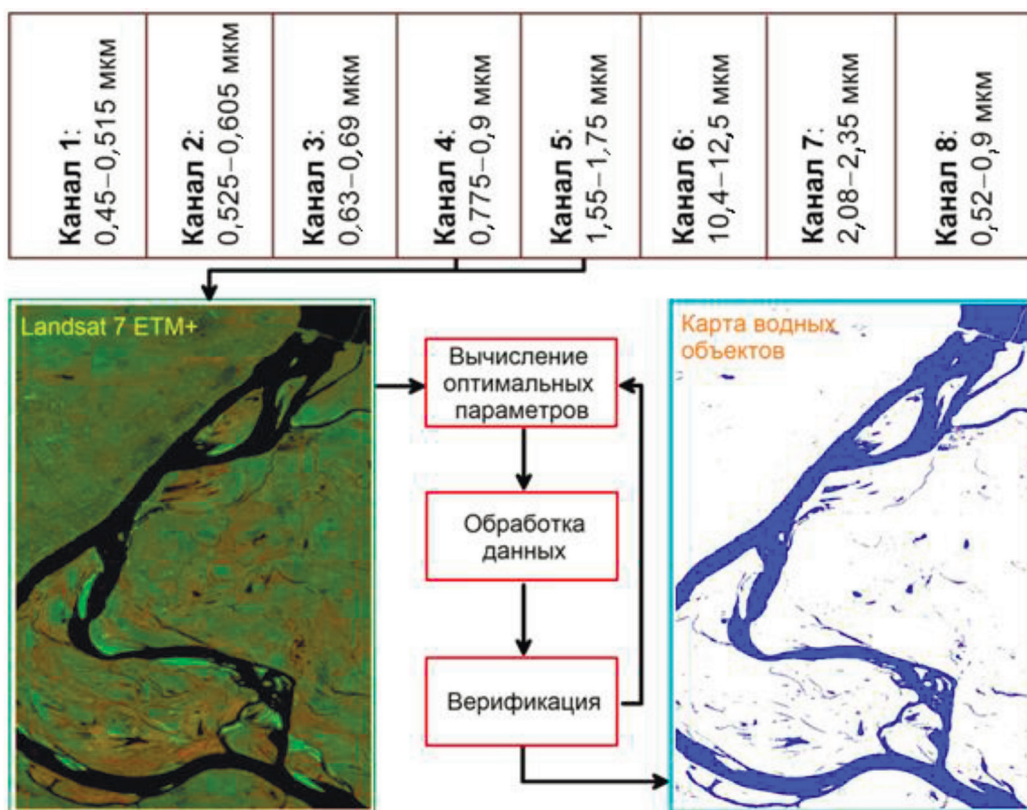


Рис. 1. Общая структура алгоритма построения системы береговых линий на основе обработки данных инфракрасных каналов Landsat-7 ETM+

Результаты

Выбор критических значений $A_{crit}^{(4b)}$, $A_{crit}^{(5b)}$ при использовании выражений (1) требует верификации посредством сравнения с другими изображениями (например, в видимом диапазоне) или данными топографических измерений. *Рисунок 2* (см. с. 31) наглядно демонстрирует влияние выбора параметров $A_{crit}^{(4b)}$, $A_{crit}^{(5b)}$ на результат построения карты водных объектов на примере северной части ВАП, для которой критические значения в выражениях (1) составляют $A_{crit}^{(4b)} = 40$, $A_{crit}^{(5b)} = 41$ (эти значения будем называть оптимальными).

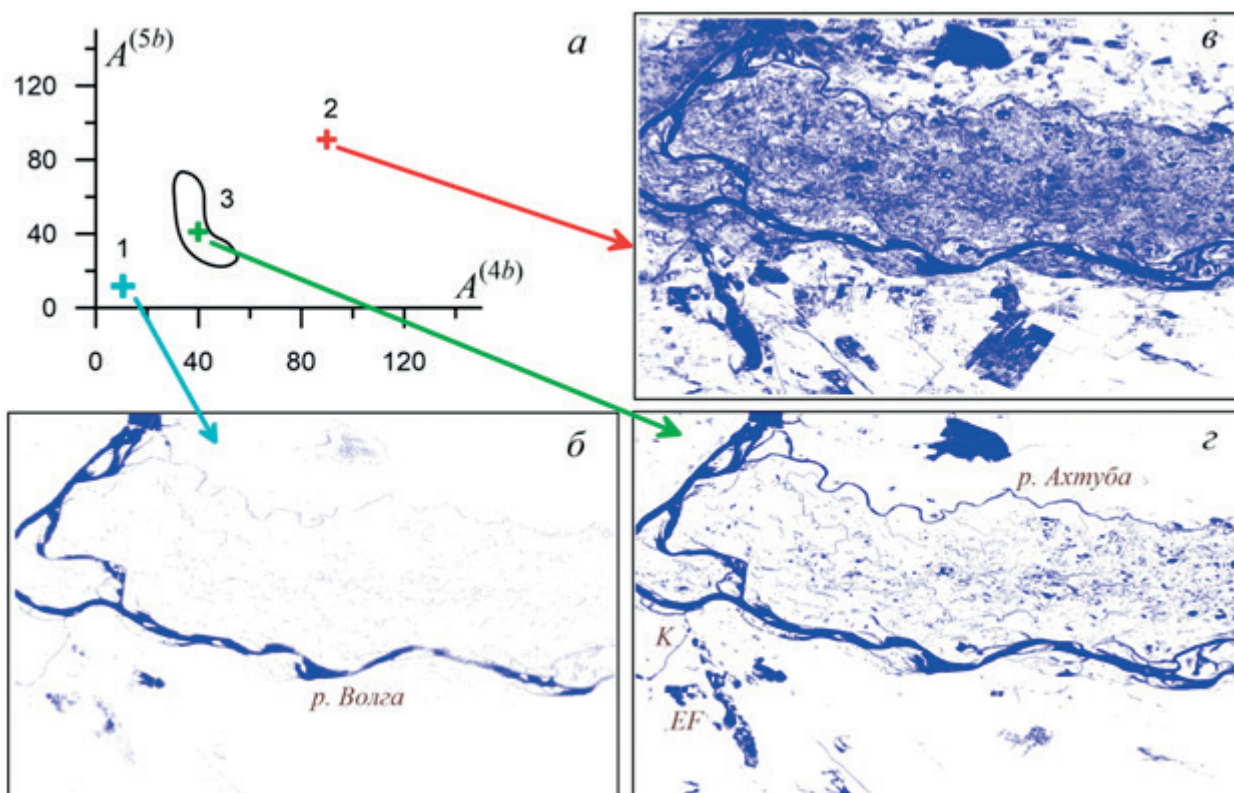


Рис. 2. Влияние выбора критических значений интенсивностей на выделение водоёмов в северной части ВАП на примере трёх пар значений $A_{crit}^{(4b)}$, $A_{crit}^{(5b)}$ (а): 1 — $A_{crit}^{(4b)}=10$, $A_{crit}^{(5b)}=10$ (б); 2 — $A_{crit}^{(4b)}=90$, $A_{crit}^{(5b)}=90$ (в); 3 — $A_{crit}^{(4b)}=40$, $A_{crit}^{(5b)}=42$ (г)

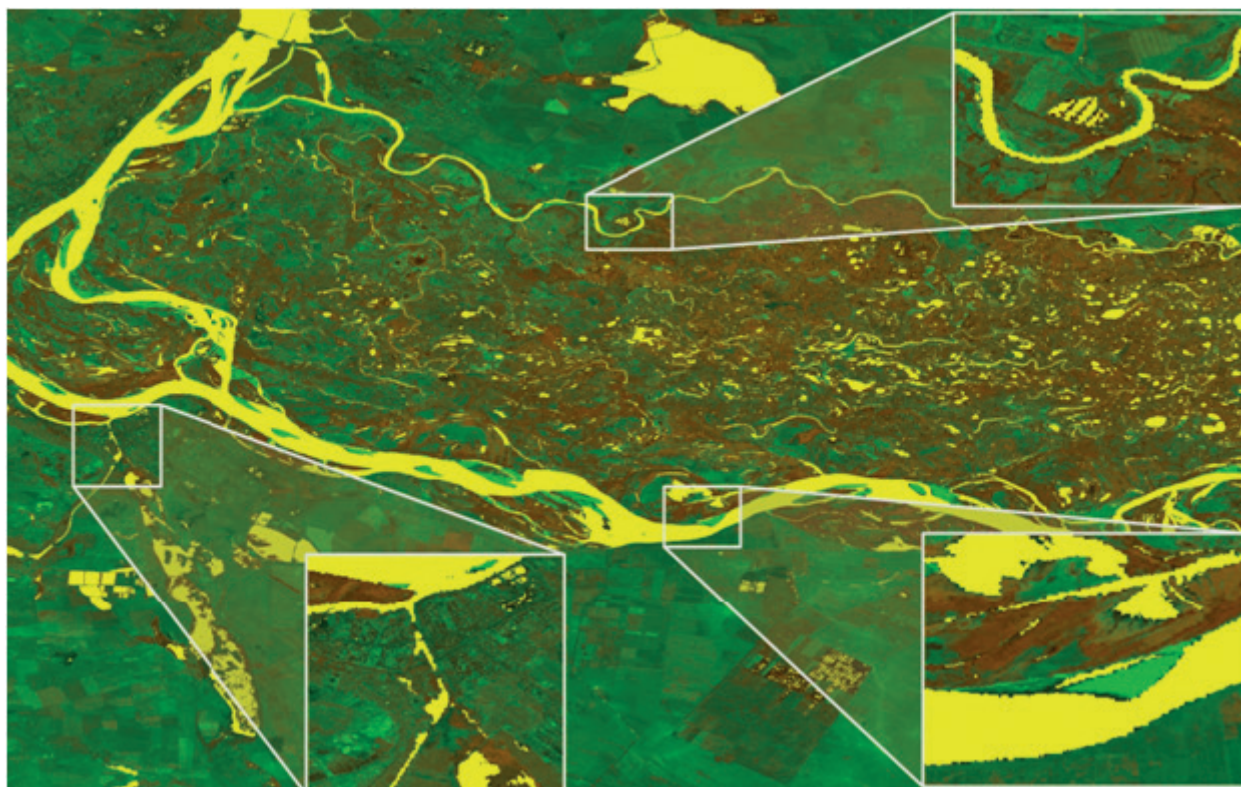


Рис. 3. Результат выделения водоёмов для северной части ВАП (жёлтый цвет). Три зоны со сложной системой водоёмов показаны на врезках

Детальный анализ показывает качественное выделение рек Волги и Ахтубы (сверху), пруда Большой Лиман в верхней части, множества озёр и протока между Волгой и Ахтубой. Зоны с протяжённым водным объектом шириной до 30 м обеспечивают верификацию качества выделения проток (ериков), оросительных каналов и других аналогичных объектов. Ширина 30 м связана с разрешением снимков ($h = 30$ м), и при использовании снимков с лучшим разрешением следует подбирать объекты соответствующих размеров для тестирования.

Рисунок 3 (см. с. 31) позволяет подробнее рассмотреть некоторые проблемные области выделения водоёмов различных типов. Здесь параметры $A_{crit}^{(4b)}$ и $A_{crit}^{\Delta b}$ немного больше оптимальных для данного снимка, поэтому получается избыточное увеличение площади водоёмов (см. верхнюю врезку). Увеличение критических значений в формуле (1) не позволяет улучшить выделение недостаточно больших водных объектов на нижних врезках. Узкие каналы выделяются прерывисто или не выделяются совсем из-за плохого разрешения исходных данных.

Отдельное внимание следует обратить на прямоугольные водоёмы в юго-западной части рис. 4 и Волго-Донской канал (см. нижнюю левую врезку на этом же рисунке). При выборе слишком высоких значений параметров $\{A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)}\}$ пашня может выделяться в качестве водоёмов, поэтому такие случаи следует тщательно проверять. Например, пруды Ергенинского рыбопитомника (группа прямоугольных объектов) частично выглядят как пахотные земли или густая растительность в видимом диапазоне (ср. рис. 4а и б), однако алгоритм (1) определяет их правильно как водные объекты.

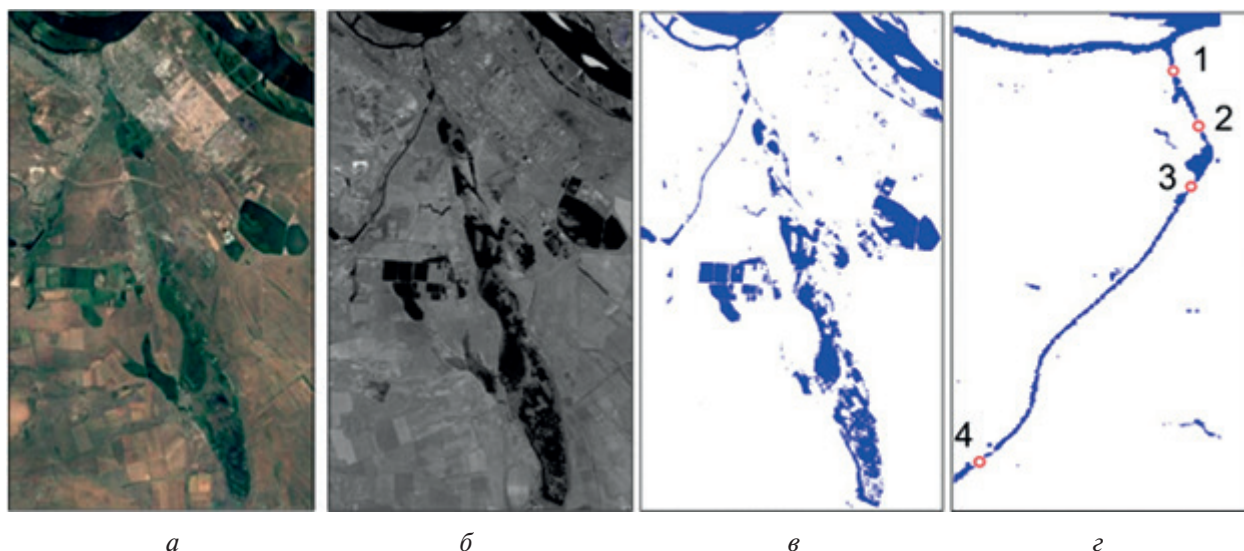


Рис. 4. Выделение водоёмов рыбного хозяйства «Ергенинский» (а — видимый диапазон, Google Планета Земля (англ. Google Earth); б — ближний инфракрасный (5-й канал ETM+); в — результат выделения водоёмов) и Волго-Донского канала (г)

Необходимо отметить неполное выделение оросительных каналов, узких протоков и ериков, поскольку их ширина в некоторых местах заметно меньше 30 м и обнаружение становится невозможным в рассматриваемом случае при $h = 30$ м. Поэтому подобные дефекты выделения являются проблемой используемых данных, а не алгоритма. Участок Волго-Донского канала в пределах снимка на рис. 3 и 5 составляет 16 км с известной шириной на всём протяжении. Ширина основной части канала лежит в пределах 60–80 м, что обеспечивает выделение 1–3 пикселей. Дополнительный анализ показывает, что для вычисления $B = 1$ необходимо, чтобы элементарная ячейка со сторонами h содержала воду на площади не менее $3h/4$. На рис. 4б красными символами (номера 1–4) указаны положения шлюзовых зон, где ширина канала не превышает 18 м и наличие воды не обнаруживается.

Для анализа эффективности выбора критических значений $A_{crit}^{A^b}$ и $A_{crit}^{(5b)}$ построим функцию $F(A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)})$ относительно целочисленных переменных $A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)} \in [0; 255]$ в виде:

$$F(A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)}) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} B_{ij}, \quad (2)$$

где величина B_{ij} указывает на наличие воды в соответствии с алгоритмом (1). Исходное изображение северной части ВАП содержит $N = N_x N_y = 10\,008\,000$ пикселей с $h = 30$ м, $N_x = 4000$, $N_y = 2502$. Функция (2) равна числу пикселей с «водой» (фактически площади) в соответствии с правилом (1) и приведена на рис. 5а. Если выполняется хотя бы одно из условий $(A_{crit}^{(4b)} \lesssim 14, A_{crit}^{(5b)} \lesssim 10)$, то алгоритм (1) практически не обнаруживает водные объекты. При $A_{crit}^{A^b} \gtrsim 55$ или $A_{crit}^{(5b)} \gtrsim 70$ функция F резко возрастает и формула (2) с учётом выражений (1) даёт асимптотику $A \rightarrow x y$ (красный цвет на рис. 6а).

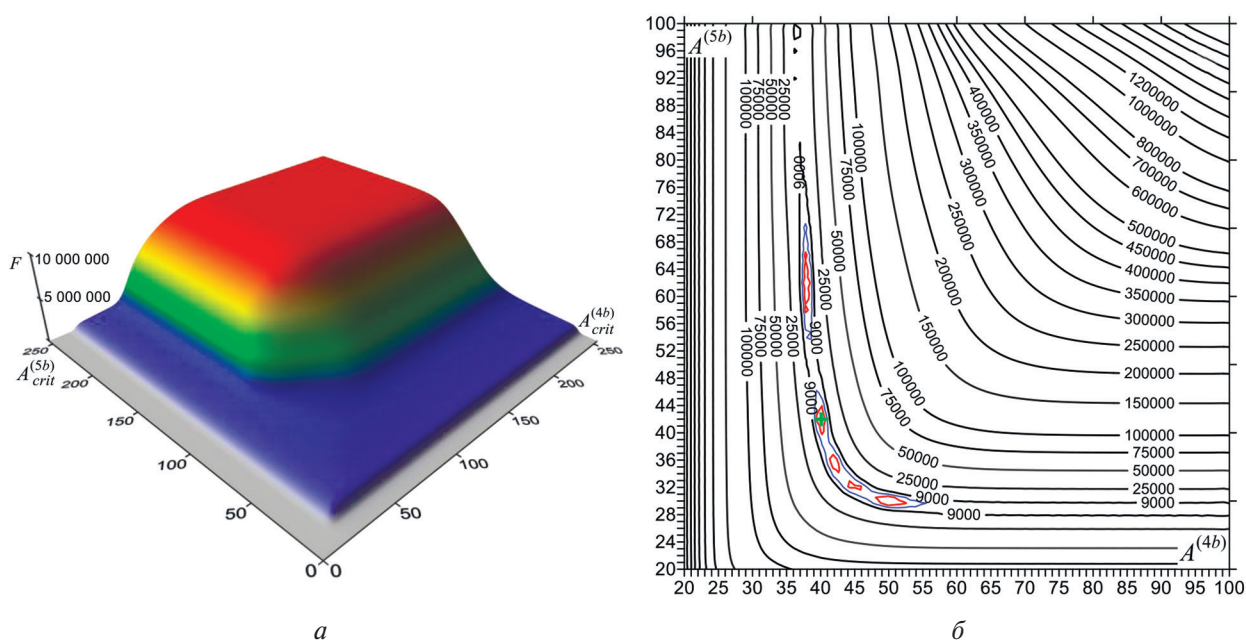


Рис. 5. Зависимость F от выбора критических значений интенсивностей в алгоритме (1) (а); изолинии функции (3) (б). Красная линия соответствует значению 4000 пикселей, синяя линия — 6000 пикселей. Зелёный крестик показывает точку (40, 42)

Область синего цвета на рис. 5а выделяет плато с медленно растущей функцией F при увеличивающихся $A_{crit}^{A^b}$ и $A_{crit}^{(5b)}$, где располагаются значения критической интенсивности излучения, обеспечивающих наиболее адекватное выделение водоёмов. Наш анализ даёт для ВАП $A_{crit}^{(4b)} = 40$, $A_{crit}^{(5b)} = 42$ со значением $F = 837\,512 \rightarrow 754 \text{ км}^2$. Рассмотрим, как отклонение от точки $A_{crit}^{(4b)} = 40$, $A_{crit}^{(5b)} = 42$ меняет погрешность выделения водных объектов. Определим функцию

$$\Delta F(A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)}) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} |B_{ij}(A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)}) - B_{ij}(40, 42)|, \quad (3)$$

которая даёт число пикселей, на которое отличается их раскраска при выборе пары $(A_{crit}^{(4b)}, A_{crit}^{(5b)})$ и для случая $A_{crit}^{(4b)} = 40$, $A_{crit}^{(5b)} = 42$. Функция ΔF имеет характерный овражный тип с несколькими локальными минимумами (см. красные линии на рис. 5б). Положения локальных минимумов можно аппроксимировать в области $A^{(4b)} \in [37; 85]$ функцией

$$A_{\min}^{(5b)} = \text{int} \left\{ 30 \cdot \exp \left(\frac{37,7 - A_{\min}^{(4b)}}{900} \right) + 32 \cdot \exp \left(\frac{37,7 - A_{\min}^{(4b)}}{2,4} \right) \right\}, \quad (4)$$

где int возвращает целое число; линия $A_{\min}^{(5b)}(A_{\min}^{(4b)})$ и её окрестность определяют критические пары точек, обеспечивающие адекватное выделение водоёмов. Формула (4) даёт локальные минимумы (дно овражной функции) ΔF с погрешностью в пределах ± 1 .

Выбор критических значений в алгоритме (1) может незначительно меняться для разных географических участков и условий спутниковой съёмки (в разные моменты времени, например из-за метеорологических условий). Подчеркнём, что указанный набор критических параметров ($A_{\text{crit}}^{(4b)} = 40, A_{\text{crit}}^{(5b)} = 42$) является эффективным для всего изображения. Если делить снимок на зоны, то для отдельных участков критические значения могут изменяться в пределах $\pm(2-4)$ ед. Это связано с особенностями атмосферы, состоянием изменчивых прибрежных объектов (растительности), а также свойствами водоёмов (заиленность или иные загрязнения). Однако такой подход существенно снижает эффективность автоматической обработки снимка. Поскольку на практике мы не знаем границы водоёмов, то разделение на зоны с разными критериями выбора критических значений интенсивности затруднено.

Обсуждение и заключение

Двухканальные изображения в ближнем инфракрасном диапазоне (4-й и 5-й каналы) обеспечивают наилучшее выделение водных объектов для данных Landsat ETM+. Этот инструмент даёт изображения для 8 каналов. Мы проанализировали различные комбинации наборов матриц $A_{ij}^{(kb)}$ ($k = 1, 2, \dots, 8$) с целью определить, какие из них наиболее эффективны для выделения водоёмов. Наилучший простой набор из двух матриц даёт комбинация $A_{ij}^{(4b)}$ и $A_{ij}^{(5b)}$. Для этих каналов определены предельные значения интенсивности радиации ($A_{\text{crit}}^{(4b)} = 40, A_{\text{crit}}^{(5b)} = 42$), дающие наилучшее выделение водоёмов, при котором число артефактов (ложных водоёмов) минимально для всей заданной территории северной части Волго-Ахтубинской поймы.

Увеличение критических значений интенсивности увеличивает число пикселей, детектируемых как ложные водоёмы. Уменьшение $A_{\text{crit}}^{(4b)}$ и $A_{\text{crit}}^{(5b)}$ приводит к обратным ошибкам, уменьшая площадь реальных водоёмов. Так, например, выбор ($A_{\text{crit}}^{(4b)} = 50, A_{\text{crit}}^{(5b)} = 50$) ложно увеличивает площадь водоёмов в этой части ВАП примерно на 90 км^2 , что составляет 12 % водной поверхности. Причём основная часть ошибок приходится на территорию междуречья между левым берегом Волги и правым берегом Ахтубы, для которой площадь ложных водоёмов увеличивается примерно на четверть. Более качественный результат можно получить, разбивая территорию на зоны и для каждой определяя свой критический уровень интенсивностей ($A_{\text{crit}}^{(4b)}, A_{\text{crit}}^{(5b)}$). Результаты вычислений критических значений интенсивности могут зависеть как от выбора спутниковых инструментов, так и выбора исследуемой территории, что требует дополнительных исследований. Для уточнения границ водоёмов на основе 4-го и 5-го каналов можно дополнительно использовать вегетативные индексы NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) по спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной областях спектра, традиционно применяемые для анализа состояния растительности (Терехин, 2021, 2022; Boori et al., 2020).

Отметим важное прикладное применение данных о динамике береговых линий малых водоёмов на территории Волго-Ахтубинской поймы и на других периодически затопляемых землях, которые позволяют уточнять цифровую модель рельефа местности (Klikunova, Khoperskov, 2019). В разные моменты времени на этапе весеннего половодья в междуречье происходят заметные изменения береговых линий водоёмов. В результате можно строить набор таких береговых линий, которые с очень хорошей точностью являются изолиниями ре-

льефа местности. Такой подход позволяет уточнять топографию местности непосредственно в критически важных зонах для гидродинамического моделирования (Кликунова и др., 2021; Isaeva et al., 2022; Khrapov, Khoperskov, 2020).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-71-00016, <https://rscf.ru/project/23-71-00016/>) с использованием высокопроизводительных вычислительных ресурсов Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Литература

1. Бычков И. В., Ружников Г. М., Федоров Р. К. и др. Классификация космоснимков Sentinel-2 Байкальской природной территории // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 1. С. 90–96. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1022.
2. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. и др. Динамика высыхания западного бассейна Большого Аральского моря по спутниковым данным (2002–2021) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 246–263. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.
3. Кликунова А. Ю., Дьяконова Т. А., Агафонникова Е. О. и др. Моделирование затоплений населенных пунктов в период весеннего паводка // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2021. Т. 24. № 3. С. 63–72. <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.6>.
4. Кравцова В. И., Вахнина О. В., Лебедева С. В. и др. Методика исследований динамики дельт приливных северных рек по космическим снимкам (на примере Северной Двины) // Геоинформатика. 2022. № 1. С. 17–31. DOI: 10.47148/1609-364X-2022-1-17-31.
5. Полищук Ю. М., Муратов И. Н., Байсаямова О. А., Набиуллина П. А. Исследование извилистости береговых границ термокарстовых озер Западной Сибири по снимкам высокого разрешения «Канопус-В» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 177–184. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-177-184.
6. Стерлядкин В. В., Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В. Предсказание наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Возможно ли это? // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 40–52. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-40-52.
7. Терехин Э. А. Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
8. Терехин Э. А. Изменение внутризональных различий в естественном растительном покрове ландшафтов лесостепи в конце XX – начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 179–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192.
9. Шинкаренко С. С., Кошелева О. Ю., Солодовников Д. А., Рулев А. С. Динамика береговой линии острова Сарпинский на Нижней Волге // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 120–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-120-129.
10. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Дорошенко В. В. Спутниковый мониторинг процессов опустынивания на юге европейской России в 2019–2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 319–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
11. Abou Samra R. M., Ali R. R. Applying DSAS tool to detect coastal changes along Nile Delta, Egypt // Egyptian J. Remote Sensing and Space Science. 2021. V. 24. No. 3. P. 463–470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.11.002>.
12. Beale J., Grabowski R. C., Long'or Lokidor P., Vercauysse K., Simms D. M. Vegetation cover dynamics along two Himalayan rivers: Drivers and implications of change // Science of the Total Environment. 2022. V. 849. Article 157826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157826>.
13. Bishop-Taylor R., Nanson R., Sagar S., Lymburner L. Mapping Australia's dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 267. Article 112734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112734>.
14. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series // Computer Optics. 2020. V. 44(3). P. 409–419. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-635.

15. *Brown A. G., Lespez L., Sear D. A. et al.* Natural vs anthropogenic streams in Europe: History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services // *Earth-Science Reviews*. 2018. V. 180. P. 185–205. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001>.
16. *Hauer C., Flödl P., Habersack H., Pulg U.* Critical flows in semi-alluvial channels during extraordinarily high discharges: Implications for flood risk management // *J. Flood Risk Management*. 2021. V. 14(4). Article e12741. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12741>.
17. *Isaeva I. I., Voronin A. A., Khoperskov A. V., Kharitonov M. A.* Modeling the Territorial Structure Dynamics of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain // *Computation*. 2022. V. 10. No. 4. Id. 62. <https://doi.org/10.3390/computation10040062>.
18. *Khrapov S. S., Khoperskov A. V.* Application of Graphics Processing Units for Self-Consistent Modelling of Shallow Water Dynamics and Sediment Transport // *Lobachevskii J. Mathematics*. 2020. V. 41. No. 8. P. 1475–1484. <https://doi.org/10.1134/S1995080220080089>.
19. *Klemas V. V.* Remote sensing of landscape-level coastal environmental indicators // *Environmental Management*. 2001. V. 27. No. 1. P. 47–57. DOI: 10.1007/s002670010133.
20. *Klikunova A. Yu., Khoperskov A. V.* Creation of digital elevation models for river floodplains // *CEUR Workshop Proc*. 2019. V. 2391. P. 275–284. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.09005>.
21. *Kuz'mina Z. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A.* Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions // *Arid Ecosystems*. 2019. V. 9. No. 4. P. 226–236. DOI: 10.1134/s207909611904005x.
22. *Markham B. L., Helder D. L.* Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 122. P. 30–40. DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.026.
23. *Matongera T. N., Mutanga O., Sibanda M., Odindi J.* Estimating and monitoring land surface phenology in rangelands: A review of progress and challenges // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 11. Article 2060. <https://doi.org/10.3390/rs13112060>.
24. *Polidori L., Caldeira C. R. T., Smessaert M., El Hage M.* Digital elevation modeling through forests: the challenge of the Amazon // *Acta Amazonica*. 2022. V. 52. No. 1. P. 69–80. DOI: 10.1590/1809-4392202103091.
25. *Rivera-Marin D., Dash J., Ogutu B.* The use of remote sensing for desertification studies: A review // *J. Arid Environments*. 2022. V. 206. Article 104829. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2022.104829.
26. *Singh A., Vyas V.* A Review on remote sensing application in river ecosystem evaluation // *Spatial Information Research*. 2022. V. 30. No. 6. P. 759–772. DOI: 10.1007/s41324-022-00470-5.
27. *Zhao Y., Zhu Z.* ASI: An artificial surface Index for Landsat-8 imagery // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. V. 107. Article 102703. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102703>.

Method for determining the coastlines of water bodies based on processing Landsat ETM+ remote sensing data

A. S. Tertychnaya, K. S. Tertychniy, A. V. Khoperskov

*Volgograd State University, Volgograd 400062, Russia
E-mail: khoperskov@volsu.ru*

The problem of determining coastlines is important for various hydrological, ecological and geophysical studies. A complex system of water bodies of different sizes on the territory of large floodplains in the presence of plant and wetlands requires special approaches to identify the water bodies boundaries. Multi-channel satellite data including infrared ranges make it possible to reliably identify water bodies. We consider the efficiency of coastline detection based on the analysis of spatial data for two infrared bands (channels 4 and 5) of Landsat ETM+. A software for the selection of water bodies from two-channel infrared images has been created. The algorithm is tested on the example of the Volga-Akhtuba floodplain, which contains both the large Volga and Akhtuba rivers and a complex small-scale system of water bodies, including narrow watercourses (eriks and small channels) and lakes of various sizes and depths. The critical values of radiation intensities which make it possible to distinguish coastlines in the entire image are 40 and 42 for the 4th and 5th channels, respectively, for the territory of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain. We also analyzed the errors in the identification of water bodies when varying the critical values of radiation intensities.

Keywords: satellite data, near infrared range, water bodies, boundaries of water bodies, Volga-Akhtuba floodplain

Accepted: 25.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-28-38

References

1. Bychkov I. V., Ruzhnikov G. M., Fedorov R. K. et al., Classification of Sentinel-2 satellite images of the Baikal Natural Territory, *Computer Optics*, 2022, Vol. 46, No. 1, pp. 90–96 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1022.
2. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. et al., The drying dynamics of the Western Large Aral Sea from satellite data (2002–2021), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 246–263 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-246-263.
3. Klikunova A. Yu., Dyakonova T. A., Agafonnikova E. O. et al., Modeling of flooding of settlements during the spring flood, *Mathematical Physics and Computer Simulation*, 2021, Vol. 24, No. 3, pp. 63–72 (in Russian), <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.6>.
4. Kravtsova V., Vachnina O., Lebedeva S. et al., Features of the methodology for studying the dynamics of tidal rivers deltas in the northern regions using satellite images (the northern Dvina as example), *Geoinformatika*, 2022, No. 1, pp. 17–31 (in Russian), DOI: 10.47148/1609-364X-2022-1-17-31.
5. Polishchuk Yu. M., Muratov I. N., Baisalyamova O. A., Nabiullina P. A., Study of the tortuosity of thermokarst lake coastlines in the eastern Russian Arctic using Kanopus-V high-resolution images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 177–184 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-177-184.
6. Sterlyadkin V. V., Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Pashinov E. V., Flood prediction on major rivers from radiometric microwave measurements from space. Is it possible? *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 40–52 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-40-52.
7. Terekhin E. A., Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series, *Computer Optics*, 2021, Vol. 45, No. 2, pp. 245–252 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
8. Terekhin E. A., Changes in intrazonal differences in the natural vegetation cover of forest-steppe landscapes in the late 20th and early 21st century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 179–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192.
9. Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Solodovnikov D. A., Rulev A. S., Coastline dynamics of the Sarpinsky Island on the Lower Volga, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 120–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-120-129.
10. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Satellite monitoring of desertification processes in the south of European Russia in 2019–2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 319–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
11. Abou Samra R. M., Ali R. R., Applying DSAS tool to detect coastal changes along Nile Delta, Egypt, *Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*, 2021, Vol. 24(3), pp. 463–470, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.11.002>.
12. Beale J., Grabowski R. C., Long’or Lokidor P. et al., Vegetation cover dynamics along two Himalayan rivers: Drivers and implications of change, *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 849, Article 157826, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157826>.
13. Bishop-Taylor R., Nanson R., Sagar S., Lymburner L., Mapping Australia’s dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 267, Article 112734, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112734>.
14. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V., Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series, *Computer Optics*, 2020, Vol. 44, No. 3, pp. 409–419, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-635.
15. Brown A. G., Lespez L., Sear D. A. et al., Natural vs anthropogenic streams in Europe: History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services, *Earth-Science Reviews*, 2018, Vol. 180, pp. 185–205, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001>.
16. Hauer C., Flödl P., Habersack H., Pulg U., Critical flows in semi-alluvial channels during extraordinarily high discharges: Implications for flood risk management, *J. Flood Risk Management*, 2021, Vol. 14, No. 4, Article e12741, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12741>.

17. Isaeva I. I., Voronin A. A., Khoperskov A. V., Kharitonov M. A., Modeling the Territorial Structure Dynamics of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain, *Computation*, 2022, Vol. 10, No. 4, Id. 62, <https://doi.org/10.3390/computation10040062>.
18. Khrapov S. S., Khoperskov A. V., Application of Graphics Processing Units for Self-Consistent Modelling of Shallow Water Dynamics and Sediment Transport, *Lobachevskii J. Mathematics*, 2020, Vol. 41, No. 8, pp. 1475–1484, <https://doi.org/10.1134/S1995080220080089>.
19. Klemas V. V., Remote sensing of landscape-level coastal environmental indicators, *Environmental Management*, 2001, Vol. 27, No. 1, pp. 47–57, DOI: 10.1007/s002670010133.
20. Klikunova A. Yu., Khoperskov A. V., Creation of digital elevation models for river floodplains, *CEUR Workshop Proc.*, 2019, Vol. 2391, pp. 275–284, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.09005>.
21. Kuz'mina Z. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 226–236, DOI: 10.1134/s 207909611904005x.
22. Markham B. L., Helder D. L., Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 122, pp. 30–40, DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.026.
23. Matongera T. N., Mutanga O., Sibanda M., Odindi J., Estimating and monitoring land surface phenology in rangelands: A review of progress and challenges, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 11, Article 2060, <https://doi.org/10.3390/rs13112060>.
24. Polidori L., Caldeira C. R. T., Smessaert M., El Hage M., Digital elevation modeling through forests: the challenge of the Amazon, *Acta Amazonica*, 2022, Vol. 52, No. 1, pp. 69–80, DOI: 10.1590/1809-4392202103091.
25. Rivera-Marin D., Dash J., Ogotu B., The use of remote sensing for desertification studies: A review, *J. Arid Environments*, 2022, Vol. 206, Article 104829, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2022.104829.
26. Singh A., Vyas V., A Review on remote sensing application in river ecosystem evaluation, *Spatial Information Research*, 2022, Vol. 30, No. 6, pp. 759–772, DOI: 10.1007/s41324-022-00470-5.
27. Zhao Y., Zhu Z., ASI: An artificial surface Index for Landsat-8 imagery, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, Vol. 107, Article 102703, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102703>.