

УДК 528.7:551.4

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-277-291

В.И. Кравцова<sup>1</sup>

## ВОЗМОЖНОСТИ СРАВНЕНИЯ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СНИМКОВ РАЗЛИЧНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ДИНАМИКИ СЕВЕРНЫХ ДЕЛЬТ

### АННОТАЦИЯ

При потеплении климата и возобновлении Северного морского пути активизировались исследования динамики северных дельт, замыкающих выход к океану. Оптимальный путь для выявления изменений – сравнение снимков, полученных в конце прошлого века со спутника Landsat/ETM (разрешение  $R = 30$  м) и современных снимков Sentinel-2/MSI ( $R = 10$  м). Чтобы выявить влияние различий в разрешении сравниваемых снимков на точность определения изменений береговой линии, выполнено графическое моделирование воспроизведения изменений (участков размыва берегов или аккумуляции отложений) на пиксельном уровне. Смоделировано воспроизведение изменений береговых линий, совпадающих по направлению с линиями сетки пикселей и отклоненных от них на углы  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , при смещении береговой линии от 10 до 40 м. Выявлено, что по разновременным снимкам с разрешением 30 и 10 м возможно определение смещения береговой линии, начиная с величины 20 м. Для береговых линий, направленных вдоль линий сетки пикселей, возможно преуменьшение (или преувеличение) полосы размыва (или аккумуляции) на величину  $1/2RL + 1/2LS = 20$  м. У береговых линий, наклоненных к сетке пикселей, возможно появление ложных изменений, особенно при неизменном положении береговой линии или ее малом смещении (10 м). Вид искажений сильно зависит от положения реальной береговой линии в пределах крупных пикселей Landsat. Наибольшие искажения характерны для береговых линий, занимающих периферийное положение в ячейках сетки пикселей. Результаты моделирования следует использовать при подготовке палеток для определения изменений по совмещенным разновременным снимкам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** снимок, пиксел, береговая линия, изменения, графическое моделирование

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: [valentinamsu@yandex.ru](mailto:valentinamsu@yandex.ru)

**Valentina I. Kravtsova<sup>1</sup>**

## **THE POSSIBILITIES OF COMPARING FOR MULTITEMPORAL IMAGERY OF VARIOUS RESOLUTION UNDER THE NORTHERN RIVER DELTAS DYNAMICS INVESTIGATION**

### **ABSTRACT**

With the warming of the climate and the resumption of the Northern Sea Route, studies of the dynamics of the northern deltas, that close the exit to the ocean, have intensified. The best way to detect changes is to compare images, obtained at the end of the last century from the Landsat/ETM satellite (resolution  $R = 30$  m) and modern Sentinel-2/MSI images ( $R = 10$  m). To identify the effect of differences in the resolution of the compared images on the accuracy of determining changes in the coastline, a graphical simulation of reproducing changes (areas of coastal erosion or sediment accumulation) at the pixel level was performed. Reproduction of changes had been simulated for coastlines, that coincide in the direction of the pixel grid lines and deviate from them at angles of  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , when the coastline is shifted from 10 to 40 m. It has been revealed that it is possible to determine the displacement of the coastline starting from the value of 20 m from multitemporal images with a resolution of 30 and 10 m. For coastlines directed along the pixel grid lines, it is possible to downplay (or exaggerate) the washout (or accumulation) band by  $1/2RL + 1/2LS = 20$  m. Coastlines that are tilted to the pixel grid may show false changes, especially if the shoreline position is unchanged or the offset is small (10 m). The kind of the distortion strongly depends on the position of the real coastline within the large Landsat pixels. The greatest distortions are characteristic of coastlines that occupy a peripheral position in the cells of the pixel grid. The simulation results should be used when preparing palettes to determine changes from combined multi-temporal images.

**KEYWORDS:** image, pixel, coastline, changes, graphical simulation

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные климатические изменения, вызвавшие сокращение площади морских льдов, обострили внимание к проблемам Северного морского пути. Дельты северных рек представляют собой важное звено выхода водного транспорта в северные моря. В связи с этим повышен интерес к динамике северных дельт, особенно в период потепления климата. Оптимальный материал для исследования динамики дельт в последние десятилетия – космические снимки. Из снимков относительно высокого разрешения, позволяющего фиксировать изменения дельт, на наиболее длительный период обеспечен фонд снимков со спутников Landsat, работающих с 1972 г. Их разрешение составляло до 1982 г. (система MSS на спутниках Landsat-1,2,3) – 80 м, до 1999 г. (система TM на спутниках Landsat-4,5) – 30 м, до настоящего времени (система ETM+ на спутнике Landsat-7 и система OLI на спутнике Landsat-8) – 15 м (в панхроматическом канале). С 2012 г. к ним добавляются снимки со спутника Sentinel с разрешением в нескольких особо важных каналах – 10 м, эти снимки предпочтительнее для последнего периода не только в связи с повышением разрешения (как пространственного, так и спектрального), но и более частой повторяемостью съемки. При таком наборе материалов логично использовать снимки со спутника Landsat на начало исследуемого периода и снимки со спутника Sentinel на настоящее время. Именно такое сочетание материалов Landsat-7/ETM+ 1999 г., 30 м, и Sentinel-2/MSI 2019 г., 10 м (далее в статье

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory,1, 119991, Moscow, Russia;  
e-mail: [valentinamsu@yandex.ru](mailto:valentinamsu@yandex.ru)

они названы просто Landsat и Sentinel) было опробовано нами при исследованиях 20-летней динамики дельты Енисея, освещенных в опубликованных статьях, в частности, (Кравцова, Вахнина «Исследование динамики дельты Енисея по разновременным космическим снимкам» // Геодезия и картография, 2020, № 1, С. 34–47), в расчете на то, что более высокое разрешение современных снимков позволит лучше улавливать небольшие изменения.

Чтобы определить возможность повышения точности определения изменений по разновременным снимкам при привлечении снимков повышенного разрешения на одну из дат, мы использовали особый методический прием – пиксельное моделирование. Этот метод основан нами в книге: (Кравцова В.И. «Дискретная пиксельная стереомодель: графическое моделирование». М.: Научный мир, 2014. 172 с.). Такое исследование в настоящее время весьма актуально, поскольку сравнение снимков со спутников Landsat и Sentinel перспективно для изучения динамики и других слабо изменчивых северных дельт, да и вообще северных побережий, в период потепления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении графического моделирования изменений в положении береговой линии за период между съемками принят ряд упрощений. Пиксельная структура изображения на снимках обоих типов представлена в виде прямоугольной сетки с частотой линий 30 м и 10 м. Рассматриваются только два объекта – вода и суша; на изображениях в ближней инфракрасной зоне, где эти объекты различаются наилучшим образом, вода имеет минимальную яркость и представлена темными пикселями, а суша – обычно максимальную яркость, ей соответствуют светлые пиксели. При подготовке разновременных снимков для последующего сравнения выполняется их яркостное квантование – разделение по уровню яркости, соответствующему границе между водой и сушей, то есть береговой линии. Определение этого уровня яркости представляет особую задачу, ее решение детально рассмотрено в упомянутой выше статье Кравцовой, Вахниной, 2020 г. Но после того, как яркостной уровень, соответствующий береговой линии, найден и выполнено квантование, все изображение представляется пикселями двух типов – воды и суши. Граница между водой и сушей – береговая линия – определяется по контакту этих пикселей. При наблюдении на экране со значительным увеличением на снимках первой даты съемки (Landsat с разрешением 30 м), она имеет более крупную ступенчатую конфигурацию, а на снимках второй даты съемки (Sentinel, 10 м) – менее грубую, мелко ступенчатую (рис. 1).

Типичная для дельты Енисея ситуация (как и для многих других северных дельт в период потепления) – размыв берегов рукавов, перемещение береговой линии в сторону суши, увеличение площади воды и уменьшение площади суши. При сопоставлении (взаимном совмещении) подготовленных разновременных снимков (геометрически и радиометрически согласованных, квантованных по яркости на объекты «вода» и «суша») получают изображение, на котором фиксируются участки изменений – появления воды на месте суши (размыва или затопления берега) или появления суши на месте воды (аккумуляции отложений). На основании такого совмещенного изображения, рассматриваемого в качестве «предкарты», далее строится карта динамики дельты.

Наиболее характерный тип изменений в дельте Енисея за рассматриваемый период – появление полос размыва вдоль морского края и берегов рукавов дельты. Ширина этих полос не велика, измеряется первыми десятками метров, они находятся на грани возможности отображения на разностных снимках, нередко имеют не сплошное, а прерывистое изображение. При обзорном картографировании всей дельты в масштабах 1:200 000–1:500 000 их показ на картах невозможен, ограничен графической точностью таких карт 0,1 мм, соответствующей ширине полос 20–50 м. Однако по ширине полосы размыва, образовавшейся за исследуемый период (в случае Енисея это 20 лет – с 1999 по 2019 гг.), можно определить среднегодовую

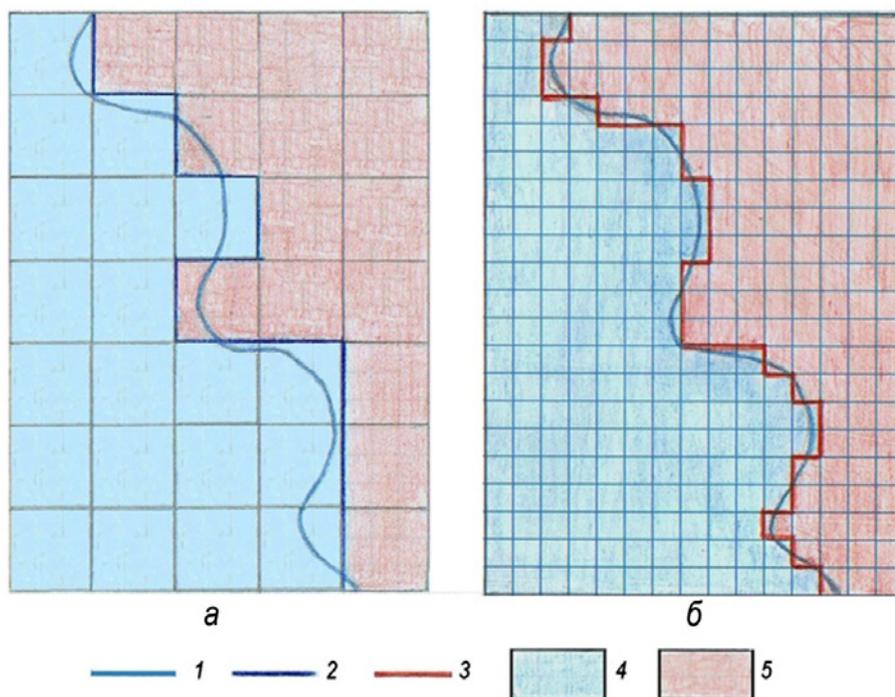


Рис. 1. Пиксельное отображение участка береговой линии на снимках Landsat (а) и Sentinel (б) в ближней инфракрасной зоне, квантованных по яркости на объекты «вода» и «суша»:

1 – реальная береговая линия; 2 – отображение береговой линии на снимке Landsat; 3 – отображение береговой линии на снимке Sentinel; 4 – вода; 5 – суша

Fig. 1. Pixel reproduction of the coastline section on Landsat (a) and Sentinel (б) images in the near infrared zone, quantized in terms of brightness into the objects “water” and “land”:  
1 – real coastline; 2 – display of the coastline on the Landsat image; 3 – display of the coastline on the Sentinel image; 4 – water; 5 – land

скорость отступления (в случае размыва) или выдвигения (в случае аккумуляции отложений) береговой линии, что позволяет судить об интенсивности динамических процессов. При значительной ширине полосы размыва, достаточно хорошо отображающейся на совмещенном изображении, определение среднегодовой скорости перемещения береговой линии не вызывает затруднений. Важно понять, как решается этот вопрос при малых величинах перемещения береговой линии, сопоставимых с разрешением снимков, к тому же различным для снимков за разные даты. Для ответа на этот вопрос обратимся к пиксельному моделированию – рассмотрению на пиксельном уровне изменений на совмещенном изображении при различных величинах смещения береговой линии за исследуемый период.

Для дельты Енисея типично направление рукавов и их береговых линий с юга на север, примерно параллельно вертикальным линиям сетки пикселей. Начнем пиксельное моделирование с этого более простого случая. Рассмотрим также случаи отклонения от вертикального направления ( $0^\circ$ ) на некоторый угол, до  $45^\circ$ . Для упрощения будем считать, что при размыве береговая линия перемещается параллельно самой себе.

Опасения относительно возможной точности определения изменений по разновременным снимкам различного разрешения относятся к случаям небольшого отступления берега, соизмеримого с разрешением снимков. Поэтому рассмотрим расхождение в положении береговой линии за разные даты в первые десятки метров, поскольку при расхождениях, существенно превышающих разрешение снимков, такие опасения не возникают.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Береговые линии, ориентированные в направлении, совпадающим с вертикальными линиями сетки пикселей

При неизменившемся за период наблюдения положении береговой линии границы между водой и сушей на снимках Landsat и Sentinel (старая и новая береговые линии) занимают одинаковое положение, совпадают, и на совмещенном снимке расхождение между ними не фиксируется (рис. 2а). Однако старая реальная береговая линия могла занимать в пределах 30-метровой колонки пикселей Landsat любое положение в 15-метровой зоне от середины этой колонки (отмеченной синим пунктиром на рис. 2а) до ее края, зафиксировавшего положение береговой линии на снимке. Точно так же новая береговая линия могла занимать в пределах 10-метровой колонки пикселей Sentinel любое положение в 5-метровой зоне от середины этой колонки (отмеченной красным пунктиром) до ее края, зафиксировавшего положение новой береговой линии на снимке. Таким образом, примыкание (совпадение) старой и новой береговых линий на совмещенном снимке может соответствовать как неизменившемуся положению (совпадению) реальных береговых линий, так и их расхождению на величину до 20 м (15 м + 5 м).

Далее рассмотрим изменения разностного изображения при смещении новой береговой линии в сторону суши, ее отступании (I) и смещении в сторону воды, выдвигании берега (II).

**I. Смещение береговой линии, ориентированной по сетке пикселей, в сторону суши, отступление берега.** При смещении береговой линии в сторону суши, ее отступании на 10 м (рис. 2-1б), совмещенное изображение зафиксирует полосу размыва или затопления (появления воды на месте суши) шириной 10 м, что соответствует 1 колонке пикселей Sentinel. Однако, учитывая возможное положение реальных береговых линий от краев до середины колонок пикселей Landsat и Sentinel, отмеченных на рис. 2 синим и красным пунктиром, ширина полосы размыва может быть больше на величину до 20 м.

Аналогично этому при отступании береговой линии на 20 м или 30 м (рис. 2-1в,г) фиксируются полосы размыва шириной две или три колонки пикселей Sentinel; как и в предыдущем случае, каждая из этих полос размыва в реальности может быть шире на величину до 20 м. Для более широких полос размыва такая возможность сохраняется, и на совмещенном снимке полосы размыва могут воспроизводиться с некоторым преуменьшением их ширины, но значимость его с увеличением ширины полос размыва уменьшается.

Таким образом, при смещении береговой линии, параллельной вертикальным линиям сетки пикселей, в сторону суши, полоса размыва фиксируется совмещенным снимком с детальностью, определяемой разрешением нового снимка, но ширина этой полосы может быть преуменьшена по сравнению с реальной на величину, составляющую сумму из 1/2 разрешения разновременных снимков.

Заметим, что такая же картина наблюдалась бы и при ориентировке береговых линий в направлении, совпадающем с горизонтальными линиями сетки пикселей. В этих случаях более детальное изображение за последнюю дату съемки позволяет фиксировать изменения с той же детальностью, но с возможным преуменьшением полосы размыва.

**II. Смещение береговой линии, ориентированной по сетке пикселей, в сторону воды, выдвигание берега.** Перемещение береговой линии, параллельной линиям сетки пикселей, в сторону воды, при выдвигании берега, аккумуляции отложений, дает более сложную картину (рис. 2-II). Как показывает рис. 2-IIб, зафиксированная совмещенным снимком полоса нарастания суши шириной 10 м может, действительно, соответствовать выдвиганию берега, аккумуляции отложений (при положении реальных старой и новой береговых линий вблизи вертикальных линий сетки пикселей снимков Landsat и Sentinel), но может также соответствовать и размыву 10 м (при положении реальных береговых линий посередине колонок пикселей Landsat и Sentinel).

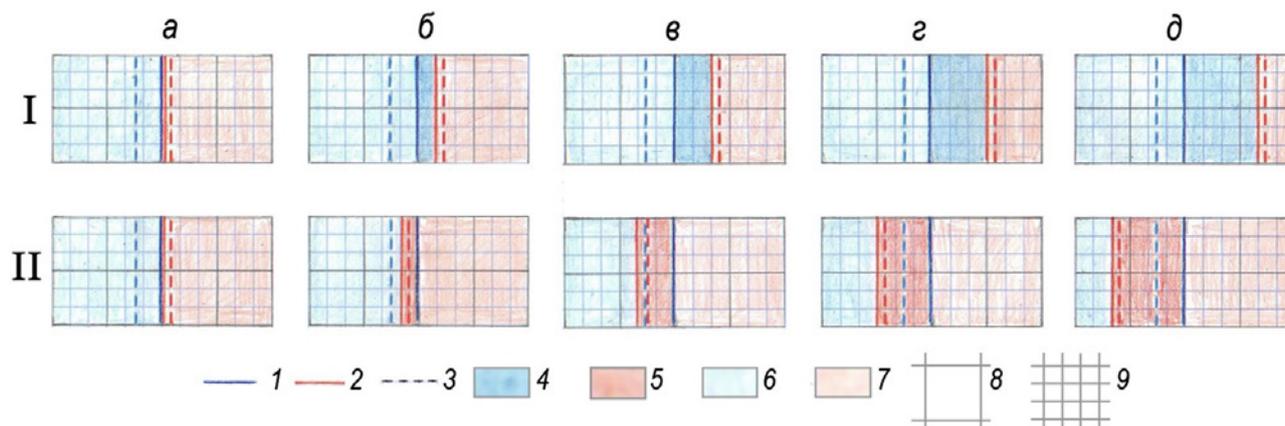


Рис. 2. Пиксельное воспроизведение на совмещенном снимке береговой линии, совпадающей по направлению с вертикальными линиями сетки пикселей:

I – при смещении береговой линии в сторону суши (размыве, затоплении берега);

II – при смещении береговой линии в сторону воды (выдвигении берега).

а – изменения отсутствуют (старая и новая береговые линии совпадают).

Величина смещения новой береговой линии: б – 10 м; в – 20 м; г – 30 м; д – 40 м.

Условные обозначения к рис. 2, 4, 5: 1 – старая береговая линия на снимке Landsat 1999; 2 – новая береговая линия на снимке Sentinel 2019; 3 – имитация береговой линии на снимке Sentinel, соответствующей отсутствию изменений; 4 – появление воды на месте суши; 5 – появление суши на месте воды; 6 – вода на оба срока съемки; 7 – суша на оба срока съемки; линии сетки пикселей: 8 – Landsat; 9 – Sentinel.

(Пунктирной линией на рис. 2 отмечена середина колонки пикселей Landsat (синий цвет) и Sentinel (красный цвет), фиксирующей береговую линию).

Fig. 2. Pixel reproduction on the joint image of the coastline, coinciding in the direction with the vertical lines of the pixel grid:

I – when the coastline displaced towards the land (erosion, flooding of the coast);

II – when the coastline moving towards the water (advancing the shore). a – there are no changes (old and new coastlines are the same).

The value of the displacement of the new coastline: б – 10 m; в – 20 m; г – 30 m; д – 40 m.

Legend for fig. 4, 6, 7: 1 – old coastline in the Landsat 1999 image; 2 – new coastline in the Sentinel 2019 image; 3 – simulated coastline in the Sentinel image corresponding to no change; 4 – the appearance of water in the place of land; 5 – the appearance of land in place of water; 6 – water for both shooting periods; 7 – land for both shooting periods; pixel grid lines: 8 – Landsat; 9 – Sentinel. (The dashed line in Fig. 2 marks the middle of the Landsat (blue) and Sentinel (red) pixel columns, which fix the coastline).

Из рис. 2-IV следует, что зафиксированная совмещенным снимком полоса нарастания суши шириной 20 м может соответствовать этой величине, если реальные старая и новая береговые линии проходят вблизи вертикальных линий сетки пикселей, но может соответствовать и меньшей величине, когда реальные береговые линии отдалены от линий сетки пикселей, и даже ситуации, когда реальные береговые линии на оба срока съемки совпадают, то есть изменения отсутствуют. Такое возможно, когда реальные береговые линии находятся посередине колонок пикселей Landsat и Sentinel.

Рис. 2-IVг показывает, что полоса нарастания суши шириной 30 м, зафиксированная совмещенным снимком при прохождении реальных береговых линий вблизи вертикальных линий сетки пикселей, может соответствовать полосе нарастания суши меньшей ширины – 10 м –

если реальные береговые линии находятся посередине колонок пикселей Landsat и Sentinel. Величина возможного преувеличения ширины полосы нарастания суши – 20 м – складывается из 1/2 разрешения снимков Landsat и Sentinel.

При дальнейшем увеличении ширины полосы нарастания суши возможность ее преувеличения до 20 м на совмещенном снимке сохраняется, но по мере расширения этой полосы имеет все меньшую значимость.

**Общие выводы по береговым линиям, совпадающим по направлению с линиями сетки пикселей.** В приведенных примерах, относящихся к наиболее простому случаю, когда направление береговых линий совпадает с вертикальными линиями сетки пикселей, показано, что различное положение реальной береговой линии внутри колонки пикселей – вблизи линии сетки пикселей или посередине колонки – при малых смещениях береговой линии решающим образом влияет на отображение изменений на разностном снимке. Это влияние проявляется по-разному при смещении береговой линии в сторону суши или в сторону воды. При отступании берега, смещении новой береговой линии в сторону суши с появлением полосы размыва (затопления), ширина этой полосы на совмещенном снимке может быть уменьшена на величину, представляющую сумму из 1/2 разрешения сравниваемых снимков (в случае сопоставления снимков Landsat и Sentinel на величину до 20 м). При выдвигении берега, смещении новой береговой линии в сторону воды, зафиксированная на совмещенном снимке полоса нарастания суши, аккумуляции, вначале (при смещении 10 м) может соответствовать остаточному затоплению, затем (при смещении 20 м) может возникать при смыкании старой и новой береговых линий, соответствовать их неизменившемуся положению. И лишь при смещении 30 м полоса однозначно соответствует выдвигению берега с возможным преувеличением ширины этой полосы на величину до 20 м, представляющую сумму из 1/2 разрешения сравниваемых снимков.

Однако случаи такого совпадения направления исследуемого объекта с линиями сетки пикселей чрезвычайно редки, и в реальности мы имеем значительно более сложную картину расположения исследуемых береговых линий под углом к сетке пикселей. Начнем ее рассмотрение с диаметрально противоположного варианта.

### Береговые линии, направленные к сетке пикселей под углом 45°

Прямолинейная береговая линия, направленная к сетке пикселей под углом 45°, воспроизводится на пиксельном изображении в виде ступенчатой линии из горизонтальных и вертикальных звеньев, ограничивающих 30-метровые (Landsat) или 10-метровые (Sentinel) пиксели (рис. 3).

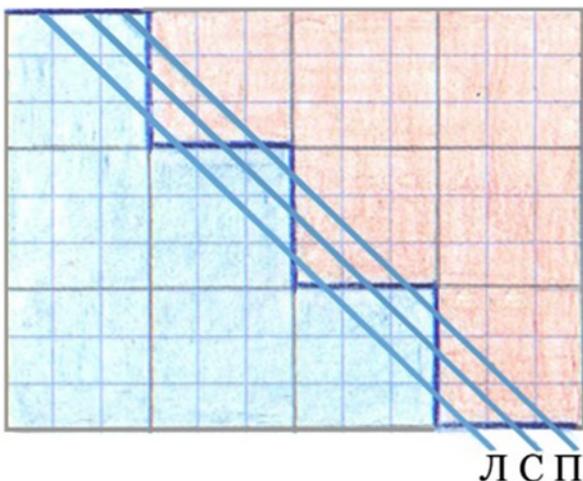


Рис. 3. Варианты положения реальной береговой линии, направленной к сетке пикселей под углом 45°, относительно ее ступенчатого отображения пикселями Landsat: Л – левое, С – среднее, П – правое  
Fig. 3. Variants of the position of the real coastline directed to the pixel grid at an angle of 45°, relative to its stepwise display by Landsat pixels: Л – left, С – average, П – right

Предшествующий эксперимент с вертикальными береговыми линиями показал, что при моделировании отображения изменений береговой линии на разностном снимке необходимо учитывать положение реальной береговой линии в пределах ячеек сетки пикселей снимка. Возможные варианты положения реальной береговой линии, направленной к сетке пикселей под углом  $45^\circ$ , относительно ее ступенчатого отображения на снимке Landsat, показаны на рис. 3; назовем их левым (Л), средним (С) и правым (П) положениями. При среднем положении реальная береговая линия пересекает звенья ее пиксельного воспроизведения посередине. При левом и правом положениях реальная береговая линия пересекает ее пиксельное отображение вблизи левых и правых поворотов ступенчатого пиксельного изображения наклонной береговой линии.

Далее рассмотрим показанное на рис. 4 отображение на совмещенном снимке неизменившейся береговой линии (колонка а) и полосы между старой и новой береговыми линиями, образующиеся при смещении последней на 10, 20, 30, 40 м (колонки б, в, г, д), а также преобразования этих полос при отступании (I) или выдвигении (II) берега. Будем рассматривать их для каждого из трех вариантов – среднего, правого и левого положений реальной береговой линии относительно сетки пикселей; на рис.4-I,II они образуют горизонтальные ряды, отмеченные буквами С, П, Л.

#### ***I. Смещение береговой линии, ориентированной под углом $45^\circ$ к сетке пикселей, в сторону суши, отступление берега***

*Ряд С – среднее положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей.*

Рис. 4-Иа показывает, что при среднем положении реальной береговой линии относительно сетки пикселей (С), в случае отсутствия изменений за исследуемый период, на совмещенном изображении образуется разрозненная цепочка из одиночных пикселей Sentinel, соответствующих отступанию и выдвигению берега при их ритмичном чередовании.

При смещении новой береговой линии, занимающей среднее положение (С), в сторону суши, отступанию берега на 10 м (рис. 4-Иб), на совмещенном изображении появляются признаки размыва – образуется разрозненная цепочка из групп по 3 пиксела Sentinel, соответствующих размыву. При смещении на 20 м (рис. 4-Ив) признаки размыва усиливаются – образуется сомкнутая цепочка из групп по 6 пикселей размыва, а смещению на 30 м (рис. 4-Иг) соответствует образование сплошной полосы размыва, ширина которой ритмично изменяется от 1 до 3 пикселей Sentinel, то есть от 10 до 30 м. При большем смещении увеличивающаяся сплошная полоса размыва также имеет ритмично меняющуюся ширину, но эти изменения при увеличении ширины полосы не столь значимы (рис. 4-Ид).

*Ряд П – правое положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей.*

Береговая линия, занимающая правое положение (П) относительно сетки пикселей, при отсутствии изменений отображается на совмещенном снимке совсем не так, как неизменившаяся линия, занимающая среднее положение, а следующим образом. Из-за различий крупно-ступенчатого изображения этой линии 30-метровыми пикселями Landsat и мелко-ступенчатого ее изображения 10-метровыми пикселями Sentinel на совмещенном снимке образуются ложные группы пикселей, соответствующих размыву. Такая неизменившаяся береговая линия П отображается в виде разрозненной цепочки из групп по 3 пиксела Sentinel, соответствующих размыву, то есть точно так же, как береговая линия С, занимающая среднее положение, при ее смещении на 10 м.

В дальнейшем смещение береговой линии, занимающей правое положение, приводит к таким же преобразованиям, как у линий среднего положения, но с опережением на 10 м: смещение линии П на 10 м соответствует смещению линии С на 20 м и т.д. Ширина полос размыва при правом положении реальной береговой линии преувеличена в среднем на 10 м относительно полос, образующихся при среднем положении.

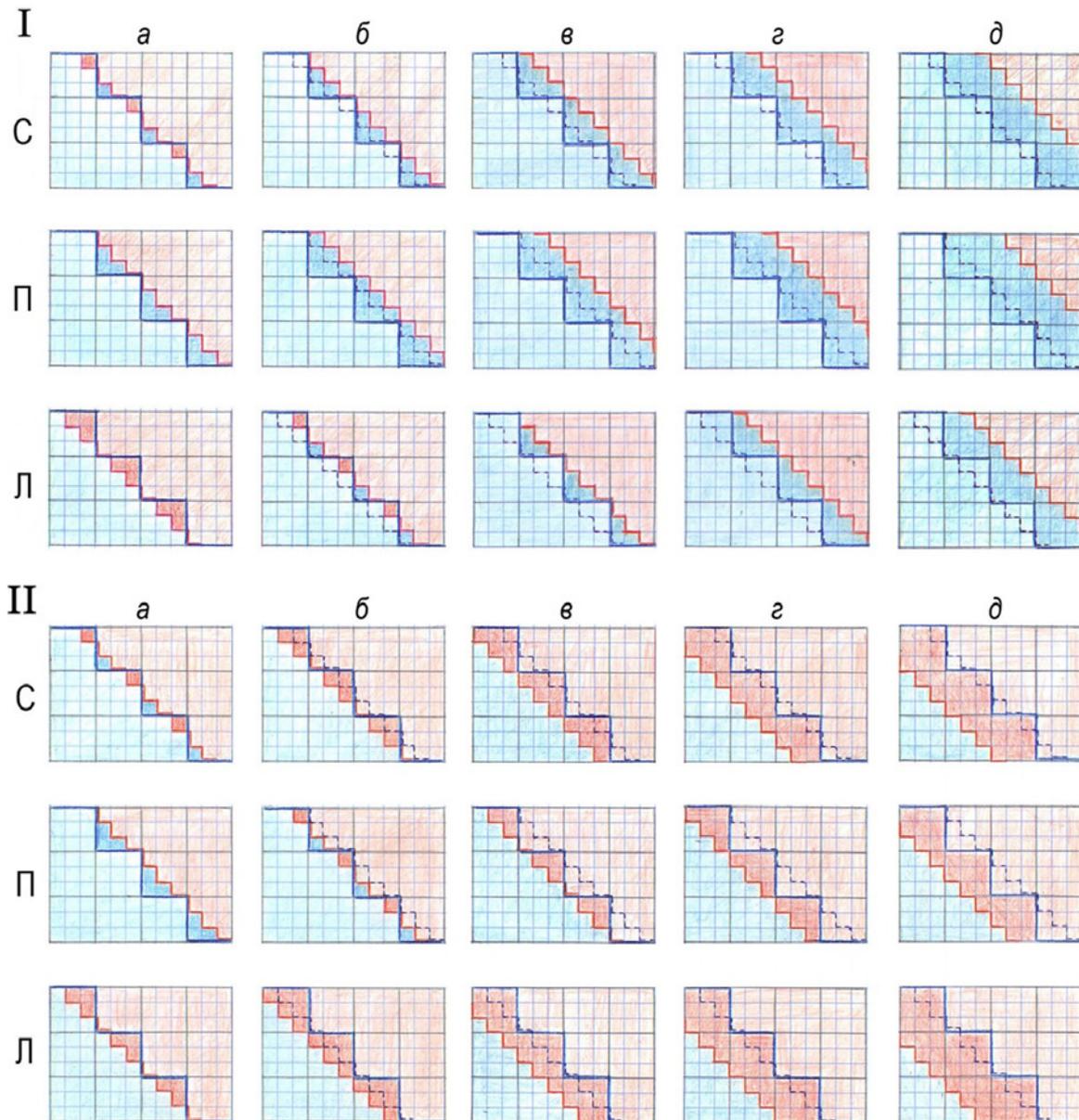


Рис. 4. Пиксельное воспроизведение на совмещенном снимке смещения береговой линии, направленной к сетке пикселей под углом  $45^\circ$ :

I – при смещении в сторону суши (размыве, затоплении берега);

II – при смещении в сторону воды (выдвигении берега).

а – изменения отсутствуют (старая и новая береговые линии совпадают).

Величина смещения новой береговой линии: б – 10 м; в – 20 м; г – 30 м; д – 40 м.

Варианты положения береговой линии относительно сетки пикселей Landsat:

С – среднее; П – правое; Л – левое

Fig. 4. Pixel reproduction on a joint image of the coastline displacement directed to the pixel grid at an angle of  $45^\circ$ :

I – when displaced towards the land (erosion, coastal flooding);

II – when moving towards the water (advancing the shore).

а – there are no changes (old and new coastlines are the same).

The value of the displacement of the new coastline: б – 10 m; в – 20 m; г – 30 m; д – 40 m.

Variants of the position of the coastline relative to the grid of Landsat pixels:

С – average; П – right; Л – left

В колонках 4-1б, в, г, д серым пунктиром показано, какое положение занимала бы береговая линия в первый срок съемки на снимках Sentinel и «восстановлена» полоса размыва, которая отобразилась бы при использовании на оба срока снимков высокого разрешения (зона между пунктирной серой и сплошной красной линиями). Хорошо видно, что преувеличение полосы размыва обусловлено ложными пикселями размыва, сформировавшимися при пиксельном отображении неизменившейся береговой линии, занимающей правое положение, за счет различий в разрешении разновременных снимков.

*Ряд Л – левое положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей.* Еще более сложным представляется преобразование береговой линии, занимающей левое положение (Л) относительно сетки пикселей. При неизменившемся положении береговой линии (колонка 4-1а в горизонтальном ряду Л) крупно-ступенчатая граница вода–суша на снимке 30-метрового разрешения совмещена с более плавной мелко-ступенчатой границей на снимке 10-метрового разрешения. При таком совмещении на разностном изображении, из-за грубого отображения береговой линии 30-метровыми пикселями Landsat, возникают ложные 10-метровые пиксели Sentinel, соответствующие появлению суши на месте воды, образующие разрозненную цепочку из групп по три пиксела с разрывами между ними в один пиксел.

Поэтому к систематическому возникновению на совмещенном изображении таких малых разрозненных участков появления суши вдоль береговой линии следует относиться с осторожностью как к возможно ложным, образующимся из-за различий в разрешении сравниваемых снимков.

В горизонтальном ряду фрагментов Л колонка 4-1б отражает ситуацию, когда новая береговая линия сместилась в сторону суши относительно старой на 10 м. При столь малом смещении на совмещенном изображении остались единичные ложные пиксели появления суши, образовавшиеся за счет грубого разрешения снимков на первую дату, но в то же время возникли одиночные пиксели появления воды на месте суши. Вдоль береговой линии сформировалась разрозненная цепочка из чередующихся 10-метровых пикселей появления воды и появления суши с разрывами между ними в один пиксел – такая же, какая характерна для отображения неизменившейся береговой линии, занимающей среднее положение (С) относительно сетки пикселей.

Таким образом, смещение береговой линии, занимающей левое положение (Л), в сторону суши на 10 м фиксируется на совмещенном изображении неоднозначно и не позволяет определить величину смещения по совмещенному изображению.

В колонке 4-1в горизонтального ряда фрагментов Л новая береговая линия сместилась в сторону суши относительно старой на 20 м. При таком смещении образовались группы 10-метровых пикселей появления воды на месте суши, формирующие разрозненную цепочку из звеньев по три пиксела Sentinel с разрывами между звеньями в один пиксел. Таким образом, смещение береговой линии в сторону суши на 20 м отобразилось на совмещенном изображении появлением вдоль береговой линии узкой полосы размыва, пока не сплошной, а прерывистой, ширина звеньев которой меняется от 1 до 2 пикселей. Прерывистость этой полосы обусловлена грубым разрешением снимков Landsat первого срока съемки.

Колонка 4-1г отражает ситуацию, когда береговая линия сместилась в сторону суши на 30 м. На совмещенном изображении сформировалась сплошная (безразрывная) цепочка из групп по шесть пикселей появления воды на месте суши; они образуют единую полосу размыва или затопления берега, ширина которой ритмично изменяется от 10 до 30 м. Аналогично этому при смещении береговой линии на 40 м, отраженном в колонке 4-1д, на совмещенном изображении вдоль берега формируется сплошная полоса появления воды на месте суши шириной от 20 до 40 м. Ширина всех этих полос, по сравнению с полосами, образующимися вдоль линий среднего положения (С), преуменьшена.

На рисунках 4-1б, в, г, д серым пунктиром показано, каким было бы положение береговой линии в первый срок съемки на снимке лучшего разрешения, и таким образом «восстановлено» положение полосы размыва для того случая, как если бы и в первый срок съемки разрешение снимков составляло 10 м. Такое «восстановление» убеждает, что преуменьшение полосы размыва обусловлено появлением ложных пикселей аккумуляции при отображении неизменившейся береговой линии, занимающей левое положение относительно сетки пикселей. В связи с таким преуменьшением, при определении среднегодовой скорости отступления береговой линии по разностному изображению, за ширину полосы размыва следует принимать наибольшую ширину звеньев – 30 м в случае 4-1г, 40 м в случае 4-1д.

*Общие выводы по береговым линиям, направленным к сетке пикселей под углом 45°, при их смещении в сторону суши.* Таким образом, при отсутствии изменений за период между съемками, неизменившаяся береговая линия, направленная к сетке пикселей под углом 45°, получает на совмещенном снимке различное отображение в зависимости от положения этой линии относительно сетки пикселей. При среднем положении для нее характерно чередование одиночных 10-метровых пикселей, соответствующих отступанию и выдвигению берега, с разрывами между ними в один пиксел. Вдоль береговых линий, занимающих правое положение, формируются ложные группы пикселей, соответствующих размыву, образующие разрозненную цепочку из участков по три пиксела с разрывами между ними в один пиксел. Вдоль береговых линий, занимающих левое положение, также формируются ложные группы пикселей, но соответствующих выдвигению берега. Они также образуют разрозненную цепочку из участков по три пиксела с разрывами между ними в один пиксел. Появление этих ложных пикселей в дальнейшем определяет искажение ширины полос отступления или выдвигения берега при малых значениях смещения береговых линий.

Смещение в сторону суши береговых линий, направленных под углом к сетке пикселей 45°, фиксируется на совмещенном изображении появлением полосы размыва, вначале прерывистой, а затем сплошной, ширина которой ритмично изменяется. У линий, занимающих правое положение относительно сетки пикселей, полоса размыва фиксируется уже при минимальном смещении (10 м) и воспроизводится с преувеличением ритмично меняющейся ширины. При расчете скорости смещения такой береговой линии следует принимать во внимание минимальную ширину полосы размыва. У линий, занимающих левое положение относительно сетки пикселей, при смещении в сторону суши на 10 м полоса размыва еще не фиксируется, а при большем смещении она воспроизводится с преуменьшением ширины. При расчете скорости смещения таких береговых линий следует принимать во внимание наибольшую из ритмично меняющейся ширины полосы.

## ***II. Смещение береговой линии, ориентированной под углом 45° к сетке пикселей, в сторону воды, выдвигение берега***

Пиксельное отображение неизменившихся береговых линий, занимающих среднее, правое и левое положения относительно сетки пикселей (рис. 4-1а), такое же, как в предыдущем случае, и объяснено выше. Смещение же береговой линии в сторону воды, при выдвигении берега, приводит к зеркально симметричным результатам.

*Ряд С – среднее положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей.* При среднем положении береговой линии ее смещение в сторону воды приводит к формированию полосы выдвигения суши, вначале (при смещении 10 м) – прерывистой, в виде разрозненной цепочки из групп по три пиксела нарастания берега с разрывами между ними в 1 пиксел (рис. 4-1б), затем (при смещении 20 м) – безразрывной цепочки из звеньев по 6 пикселей нарастания берега (рис. 4-1в), и далее (при смещении более 30 м) – сплошной полосы выдвигения суши, ширина которой ритмично изменяется (рис. 4-1г, д).

*Ряд П – правое положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей.* Поскольку при пиксельном воспроизведении неизменившейся береговой линии, занимаю-

щей правое положение (П) относительно сетки пикселей, характерно ее сопровождение ложными пикселями размыва (рис. 4-Па), то смещение береговой линии в сторону воды вначале (при смещении 10 м) преодолевает (компенсирует) эту несплошную ложную полосу размыва (рис. 4-Пб), и лишь при смещении 20 м образуется разрозненная цепочка из групп по три пиксела нарастания берега с разрывами между ними в 1 пиксел (рис. 4-Пв), такая же, как при смещении береговой линии среднего положения (С) на 10 м. Дальнейшее смещение береговой линии П на 30 м приводит к формированию безразрывной цепочки из групп пикселей выдвижения берега (рис. 4-Пг), а затем и сплошной полосы нарастания суши, ширина которой ритмично меняется (рис. 4-Пд). Ширина полос выдвижения берега в этом случае, по сравнению с формирующимися у линий среднего положения, преуменьшена. Как показывает «восстановление» полос нарастания суши для случая, когда и в первый срок съемки разрешение снимков было бы высоким, преуменьшение вызвано различиями в разрешении одновременных снимков, которые обусловили формирование ложных пикселей размыва вдоль неизменившейся береговой линии. При расчете среднегодовой скорости нарастания берега следует учитывать наибольшую ширину полос размыва.

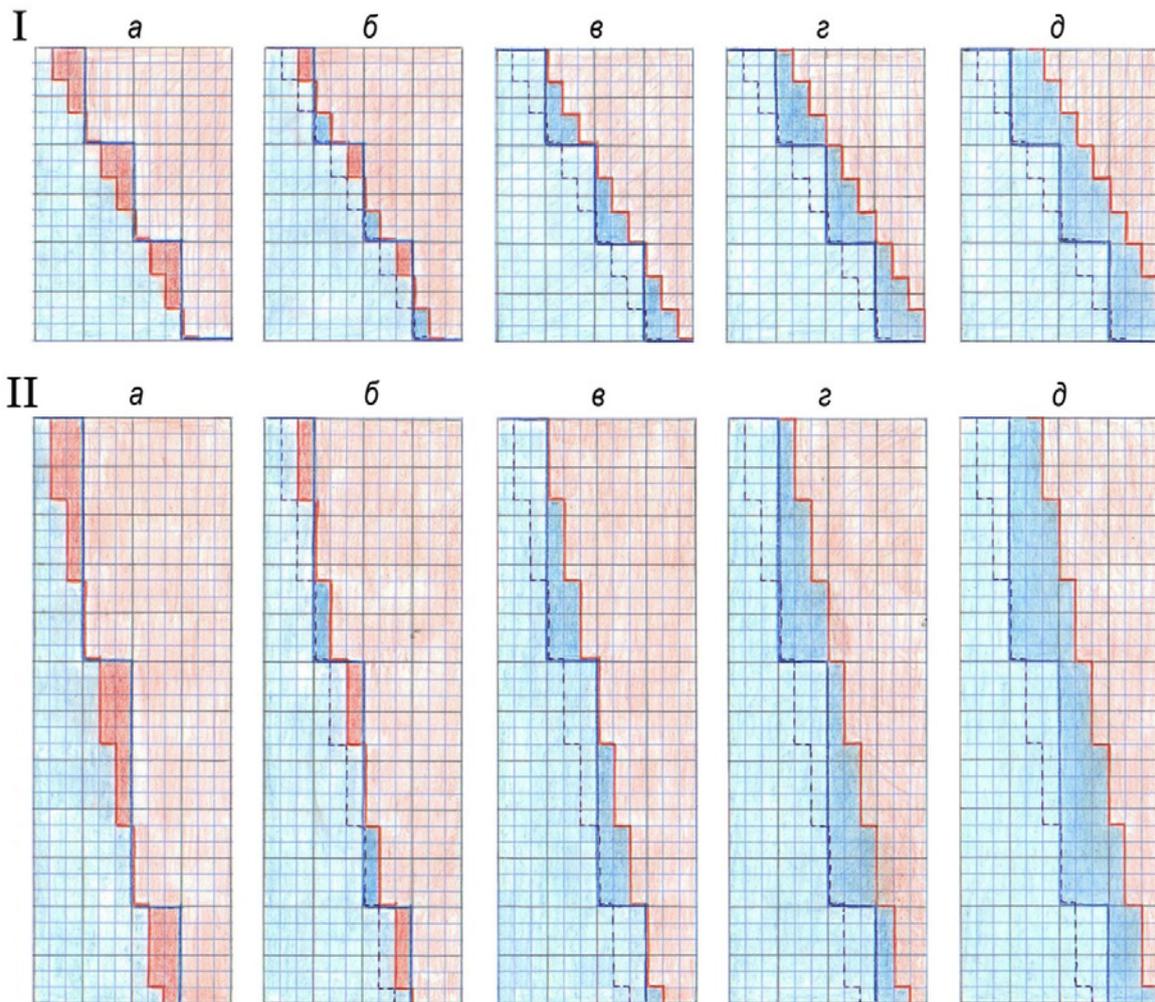
*Ряд Л – левое положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей.* Пиксельное отображение неизменившейся береговой линии, занимающей левое положение относительно сетки пикселей, отличается наличием ложных пикселей выдвижения берега в виде разрозненной цепочки из звеньев по 3 пиксела с разрывами между ними в 1 пиксел. Смещение береговой линии в сторону воды на 10 м приводит к расширению этих звеньев и формированию безразрывной цепочки, а затем, при смещении 20 м и более, – сплошной полосы выдвижения берега, ширина которой ритмично изменяется. Ширина этой полосы, как видно на «восстановленном» изображении для случая высокого разрешения и в первый срок съемки (серый пунктир), на отдельных участках преувеличена за счет ложных пикселей нарастания суши, сопровождавших отображение неизменившейся береговой линии на разностном снимке. При расчете скорости нарастания берега следует принимать во внимание минимальную ширину полосы выдвижения суши.

### **Береговые линии, имеющие различное направление к сетке пикселей**

В реальных условиях направление береговых линий относительно сетки пикселей меняется произвольно. Для анализа преобразования линий промежуточных направлений между  $0^\circ$  и  $45^\circ$ , нами было проведено пиксельное моделирование для линий, направленных к сетке пикселей под углами  $30^\circ$ ,  $22,5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $7,5^\circ$ . Поскольку общие закономерности преобразования изображения у этих линий сохраняются, покажем их на выборочных примерах линий, направленных к сетке пикселей под углами  $30^\circ$  и  $15^\circ$ . Из возможных вариантов положения линий относительно сетки пикселей и направления смещения линий приведены наиболее сложные – линии, занимающие левое положение, при их смещении в сторону суши, размыве или затоплении берега (рис. 5).

Как и в случае линий левого положения, направленных к сетке пикселей под углом  $45^\circ$  (рис. 4-1а, ряд Л), неизменившееся положение рассматриваемых линий воспроизводится на совмещенном снимке с появлением ложных участков выдвижения суши, которые при меньшем угле отклонения линии становятся более вытянутыми в вертикальном направлении, занимают больше 10-метровых пикселей (рис. 5-1а, -1а).

При смещении новой береговой линии в сторону суши на 10 м такие ложные участки выдвижения суши сокращаются и появляются участки отступления берега, размыва. Чередование вдоль береговой линии остаточных ложных пикселей выдвижения суши и пикселей ее начавшегося размыва не дает возможности однозначно определить тенденцию изменений.



*Рис. 5. Пиксельное воспроизведение на совмещенном снимке смещения в сторону суши (при размыве, затоплении берега) береговой линии, занимающей левое положение относительно сетки пикселей, и направленной к сетке пикселей под разными углами: I – 30°; II – 15°. а – изменения отсутствуют (старая и новая береговые линии совпадают). Величина смещения новой береговой линии: б – 10 м; в – 20 м; г – 30 м; д – 40 м.*

*Fig. 5. Pixel reproduction on a joint image of the displacement towards the land (during erosion, flooding of the coast) of the coastline occupying the left position relative to the pixel grid and directed to the pixel grid at different angles:*

*I – 30°; II – 15°. а – there are no changes (old and new coastlines are the same).*

*The value of the displacement of the new coastline: б – 10 m; в – 20 m; г – 30 m; д – 40 m.*

При смещении новой береговой линии в сторону суши на 20 м на совмещенном снимке образуются участки отступления суши, формирующие разрозненную цепочку из групп пикселей размыва, которая при смещении береговой линии на 30 м становится сомкнутой, а далее превращается в сплошную полосу размыва, ширина которой ритмично изменяется. По сравнению с реальной полосой размыва, «восстановленной» для случая, когда разрешение снимка первого срока съемки было бы также высоким, ширина полосы размыва преуменьшена на отдельных участках на 10–20 м и при расчете среднегодовой скорости отступления береговой линии следует принимать во внимание наибольшую ширину зафиксированной полосы размыва.

Таким образом, закономерности пиксельного преобразования, выявленные для линий, направленных к сетке пикселей под углом 45°, сохраняются и для других линий, имеющих раз-

личное направление к сетке пикселей, но с уменьшением угла отклонения береговой линии от вертикальных линий сетки пикселей протяженность и площадь участков ложных изменений увеличивается.

Как и в случае направления береговой линии к сетке пикселей под углом  $45^\circ$ , при отклонении под меньшими углами ( $30^\circ$ ,  $15^\circ$ ) на разностном изображении гарантированно фиксируется смещение положения береговой линии на 20 м и более, вначале в виде прерывистой, несплошной полосы появления воды (разомкнутой цепочки звеньев), а затем сплошной, но имеющей преуменьшенную ширину, ритмично изменяющуюся. При определении скорости смещения береговой линии следует использовать наибольшую величину ширины полосы.

Меньшее смещение береговой линии (10 м) находит при левом положении реальной береговой линии относительно сетки пикселей неоднозначное отображение на разностном снимке, а при отсутствии изменений береговой линии возможно появление ложных пикселей изменений (размыва – при правом положении реальной береговой линии относительно сетки пикселей и аккумуляции – при ее левом положении), обусловленное различиями разрешения сравниваемых разновременных снимков.

Преобразования, рассмотренные на рис. 5 для одного случая (береговых линий, занимающих левое положение, при их смещении в сторону суши), аналогичны выявленным выше (для угла  $45^\circ$ ) и в отношении береговых линий, занимающих также среднее и правое положение при их смещении как в сторону суши, так и в сторону воды.

## ВЫВОДЫ

Приведенные материалы экспериментов по пиксельному моделированию показывают, что для береговых линий, по направлению совпадающих с вертикальными линиями сетки пикселей, ширина полосы размыва при отступании берега может быть преуменьшена, а полосы нарастания суши при выдвигании берега преувеличены на значение, представляющее сумму из  $1/2$  разрешения сравниваемых разновременных снимков (то есть в случае сравнения снимков Landsat и Sentinel – на 20 м).

Для береговых линий, направленных к сетке пикселей под углом, различия в разрешении сравниваемых разновременных снимков могут приводить к появлению ложных изменений на совмещенном изображении, что наиболее четко проявляется при отсутствии изменений береговой линии, когда за счет более грубого разрешения снимков Landsat вдоль береговой линии образуются ложные пиксели появления суши на месте воды (при левом положении реальной береговой линии относительно сетки пикселей), либо появления воды на месте суши (при правом положении реальной береговой линии относительно сетки пикселей).

Положение реальной береговой линии относительно сетки пикселей влияет не только на воспроизведение береговой линии при отсутствии изменений, но вызывает также ускорение или замедление темпа преобразования изображения при смещении береговой линии, преувеличение или преуменьшение ширины полосы размыва или аккумуляции, определяет возможность отображения изменений при малых величинах смещения береговой линии.

Для береговых линий, занимающих среднее положение, смещение на 10 м в сторону суши (либо в сторону воды) уже проявляется образованием разрозненных цепочек из групп пикселей размыва (либо аккумуляции), которые при смещении на 20 м становятся сомкнутыми цепочками, а далее превращаются в сплошные полосы размыва (либо выдвигания берега), имеющие ритмично изменяющуюся ширину.

Для береговых линий, занимающих правое положение, смещение в сторону суши на 10 м ведет к расширению существовавших уже при неизменившемся положении разомкнутых цепочек пикселей размыва, превращению их в сомкнутые цепочки, а при смещении на 20 м – в сплошные полосы размыва, в дальнейшем расширяющиеся. По сравнению с изменениями береговой линии среднего положения, расширение полосы размыва идет с опережением на 10 м.

Аналогичные преобразования происходят с береговыми линиями, занимающими левое положение, при их смещении в сторону воды – полоса выдвигания берега нарастает с опережением на 10 м, по сравнению с изменениями береговой линии среднего положения, и имеет большую ширину.

Более сложно преобразуются береговые линии левого положения при их смещении в сторону суши и береговые линии правого положения при их смещении в сторону воды, у которых знак ложных пикселей, сопровождающих неизменившееся положение линии, и направление смещения совпадают. Так, в случае движения береговой линии левого положения в сторону суши, при смещении береговой линии 10 м вначале преодолевается (компенсируется) цепочка ложных пикселей аккумуляции, а при смещении 20 м формируется разрозненная цепочка групп пикселей размыва, затем превращающаяся в сомкнутую цепочку и потом в сплошную полосу размыва. По сравнению с линией среднего положения преобразование идет с замедлением на 10 м, а ширина полос размыва преуменьшена.

Аналогичная картина наблюдается при смещении в сторону воды береговой линии правого положения, где при смещении 10 м вначале преодолевается ложная цепочка групп пикселей размыва, сопровождающая эту линию при неизменном положении, а затем постепенно, с замедлением, формируется полоса выдвигания берега, ширина которой преуменьшена. При определении среднегодовой скорости смещения береговой линии следует учитывать такое возможное изменение ширины.

Отмеченные особенности пиксельного рисунка на разностном изображении при смещении береговой линии сохраняются для береговых линий различной ориентировки относительно линий сетки пикселей (в исследованных случаях  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$ ), различаясь лишь по форме участков появления воды на месте суши, либо появления суши на месте воды.

Выполненный на пиксельном уровне анализ изображения, полученного при совмещении разновременных снимков, показывает, что при небольших изменениях положения береговой линии, привлечение снимков повышенного разрешения для одной из дат разновременной съемки (как правило, это более современная дата) увеличивает возможности количественного определения малых изменений, способствует повышению точности. Пиксельное моделирование показало, что по разновременным снимкам с разрешением 30 и 10 м возможно определение смещения береговой линии начиная с величины 20 м. Поэтому правило учета наиболее слабого звена при оценке точности измерений по разновременным снимкам в данном случае не действует и привлечение снимков лучшего разрешения на одну из дат способствует улучшению результата.

Важно также, что при изменении береговых линий среднего положения по пиксельной форме полос расхождения старой и новой линии (полос размыва или аккумуляции) можно судить о величине смещения, или, переходя к среднегодовым величинам, – о скорости размыва. Это открывает исследователю возможность создания новых простых средств (например, измерительных палеток) для определения небольших изменений с учетом формы полос изменений.

Хотя выявленные закономерности пиксельного преобразования при сопоставлении разновременных снимков разного разрешения обнаруживают сильную зависимость этого преобразования от положения реальных береговых линий относительно сетки пикселей, но знание этих закономерностей позволяет осмысленно подходить к анализу разностного снимка, реализуя правило: «предупрежден – значит вооружен».

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследование выполнено по проекту РФФИ 18-05-60221. Особая благодарность Е.А. Балдиной за помощь в подготовке иллюстраций.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

The study was supported by RFBR grant 18-05-60221. Special thanks to E.A. Baldina for her help in preparing the illustrations.