

УДК 629.7.05 (282.247.42)

© В.И. Кравцова, В.В. Шуматиев

В.И. Кравцова, В.В. Шуматиев

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБРАБОТКЕ РАЗНОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДЕЛЬТЫ УРАЛА

В наше время сильнейшего антропогенного воздействия на природу Земли, глобального потепления климата, опасений за экологическое состояние планеты, особую остроту приобретают методы изучения изменений природной среды. Одним из таких важнейших методов служит космическая съемка, характеризующаяся оперативностью поступления информации, возможностью регулярного повторения наблюдений при достаточно высоком разрешении.

Изменения в состоянии природной среды выявляются на основе сопоставления разновременных космических снимков. Общеизвестные приемы обработки разновременных снимков при исследованиях динамики включают:

1. Выбор адекватных для сравнения изображений (например, обеспечение сезонной идентичности состояния ландшафтов при изучении многолетних изменений с тем, чтобы не принять сезонные изменения за многолетние);

2. Трансформирование изображений для приведения их к единой картографической проекции и масштабу, взаимная координатная привязка разновременных изображений (геокодирование);

3. Сопоставление геокодированных разновременных изображений с использованием средств их поочередного или одновременного наблюдения (например, модули *Swipe* и *Blend* в программе *ERDAS*; первый отодвигает верхнее изображение, второй делает его прозрачным) для выявления изменений;

4. Экранное дешифрирование каждого из разновременных изображений с обводкой контуров отдешифрированных объектов в векторном формате, либо выполнение по каждому из разновременных снимков классификации исследуемых объектов (неконтролируемая кластеризация с дальнейшим объединением кластеров или контролируемая классификация с использованием эталонов);

5. Сочленение результатов обработки разновременных снимков – составление матрицы изменений, два входа которой соответствуют классам, выделенным по снимкам за каждый из двух сроков наблюдения. По диагонали матрицы располагаются неизменившиеся объекты, а по обе стороны от диагонали фиксируются типы изменений (замещение одних классов другими);

6. Вместо 4-ого и 5-ого этапов возможно также использование так называемой «многозонально-многовременной» классификации, когда набор обучающих выборок, пространственно идентичных на обоих сравниваемых снимках, проводят по снимкам за обе даты. Такую классификацию иногда рассматривают как обработку совмещенного изображения за два срока.

В практической работе 4-ый и 5-ый этапы представляют довольно сложные процедуры, особенно анализ матрицы изменений и вычленение тех категорий, которые действительно характеризуют типичные изменения на местности, отделение их от случайных сочетаний разновременных объектов. Выполнение же «многозонально-многовременной» классификации еще труднее; число зон для нескольких разновременных многозональных изображений возрастает, автоматизированный анализ яркостей проводится в многомерном пространстве и эффективен лишь для наиболее четко разделяемых на снимках объектов.

В связи с этим стоит задача поиска более простых, приемлемых в повседневной оперативной работе методов изучения динамики по разновременным снимкам. Нами опробован и предлагается в настоящей работе метод выявления изменений по разновременным снимкам на основе синтеза единого цветного «многовременного» изображения по снимкам за разные даты и дальнейшего анализа этого изображения.

Попытки синтеза цветного изображения из разновременных снимков нередко приводят к негативному результату – в пестроте цветов полученного снимка трудно выявить участки изменений и тем более определить характер этих изменений.

Однако в тех случаях, когда исследуемые изменяющиеся объекты характеризуются яркостью, надежно выделяющей их из окружающего фона, или когда происходят изменения границ между резко различными по яркости объектами (например, черная вода и белый песок пляжей береговой зоны), такой синтез «разновременного» снимка может дать наглядную картину происходящих изменений.

Мы опробовали методику изучения изменений по разновременным снимкам с использованием цветового синтеза снимков за разные даты при изуче-

нии динамики дельты р. Урала на северном побережье Каспийского моря.

Каспийское море, испытывающее многолетние колебания уровня, представляет собой своеобразный природный полигон, моделирующий ситуации, ожидаемые в будущем в связи с повышением уровня Мирового океана при глобальном потеплении климата.

Оценка воздействия изменений уровня приемного водоема на процессы дельтообразования весьма актуальна для прогнозирования возможной реакции дельт мира на ожидаемое повышение уровня Мирового океана. Она имеет также важное практическое значение в связи с проблемами прогнозирования наводнений в дельтах, подтопления и затопления земель, проникновения осолоненных вод в реки, а также в связи с разработкой мер борьбы с этими негативными явлениями.

Многолетние наблюдения за состоянием берегов северо-западного и северного Каспия (Кравцова, Лукьянова, 1997; Кравцова, Мяло, 1998; Kravtsova, Lukyanova, 2000) а также дельт Каспийских рек (Кравцова, Лурье, Илюхина, 2000; Кравцова, Илюхина, 2002; Кравцова, Михайлов, Ермошкин, 2003) проводятся лабораторией аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова совместно с лабораторией морской геоморфологии кафедры геоморфологии и кафедрой гидрологии суши. В предшествующих исследованиях были изучены изменения дельты Урала при максимальном падении уровня Каспия (1976), его резком подъеме (1992, 1996) и небольшом спаде (2000) (Михайлов, Кравцова, Магрицкий и др., 2004). В настоящем исследовании они продолжены для периода относительной стабилизации уровня (2000-2003), когда изменения становятся менее заметными и их определение осложняется. Поэтому важную цель работы составил выбор оптимального способа решения этой задачи путем сравнения различных методик обработки снимков.

В предшествующих исследованиях анализ и картографирование состояния и динамики береговой зоны в районе дельты Урала проводились для периода падения уровня моря (Краснова, 1937; Красножон, Мазавина, 1988; Михайлов, 1997). Для периода подъема уровня после 1977 г. они выполнены В.И. Кравцовой и И.С. Ермошкиным для четырех временных срезов (рис. 1) и составлена серия карт, отражающих динамику дельты за три периода: 1975-1992, 1992-1996, 1996-2000 гг. (рис. 2).

Карты показывают, что в период интенсивной трансгрессии 1975-1992 гг. при подъеме уровня на 1,7 м, была затоплена и затем заросла тростником полоса бывшего берега шириной 15 км восточнее устья Урала (включая полуостров Пешной) и шириной 25 км западнее устья, где образовался залив. В

широкой полосе сформировавшейся тростниковой осушки появились вытянутые вдоль берега окна открытой воды (лагуны) шириной 3 км. Произошла трансформация сухой дельты в заболоченную, плавневую, с лагунами.

В 1992-1996 гг., при дальнейшем подъеме уровня моря еще на 0,6 м, когда со времени начала трансгрессии подъем составил к 1995 г. 2-4 м, произошло затопление части тростника, как со стороны моря (граница тростника отступила в сторону суши на 3 км), так и вблизи суши, где лагуны расширились до 7 км. Некоторые из рукавов Урала, ранее высохшие, оказались подтоплены, русла их обводнены.

При небольшом снижении уровня моря за 1996-2000 гг. на 0,3 м тростниковые заросли снова начали разрастаться, граница тростниковой осушки продвинулась в море на 1 км. Ранее обводнившиеся русла вновь стали сухими.

При столь значительных по площади изменениях для выявления динамики дельты применялось дешифрирование по экрану снимков за каждый временной срез (т.е. за четыре даты); дальнейшее сопоставление разновременных карт и создание матрицы изменений для каждого периода дали оптимальные результаты. Однако замедление темпов динамики в последние годы потребовало новых методических подходов.

В настоящей статье представлены методы и результаты изучения изменений дельты за непродолжительный период 2000-2003 гг. Исходными материалами служили снимок со спутника Ресурс-О, полученный 5 августа 2000 г. (съёмочная система МСУ-Э, разрешение 45 м) и снимок со спутника Метеор-3М, полученный 30 августа 2003 г. (также система МСУ-Э с разрешением 45 м) (рис. 3), которые были трансформированы в единую проекцию и взаимно привязаны.

Уровень моря к этому времени, после достижения максимума подъема в 1995 г. до отметки –26,66 м, стал снижаться, достигнув к 2000 г. отметки –27,10 м. Снижение продолжалось и в 2001 г. (до –27,20 м), а в 2002, 2003 гг. уровень немного повысился до –27,11 м. Таким образом, за исследуемый период можно считать его стабилизировавшимся при небольших разнонаправленных колебаниях. Оба сопоставляемые снимка сделаны в августе, при уровне моря, наиболее близком к среднегодовому, сезонные колебания уровня не осложняли сопоставление. В связи с относительной стабильностью уровня и изменения состояния дельты за этот период невелики, проявляются на мелкоконтурных участках и имеют разнонаправленный характер. Отмечается как небольшое приращение суши и тростниковых зарослей, так и их затопление. Эти участки невелики по площади, имеют сложные контуры и их выделение при экранном дешифрировании снимков с обводкой контуров не имело смысла. Только при сохранении

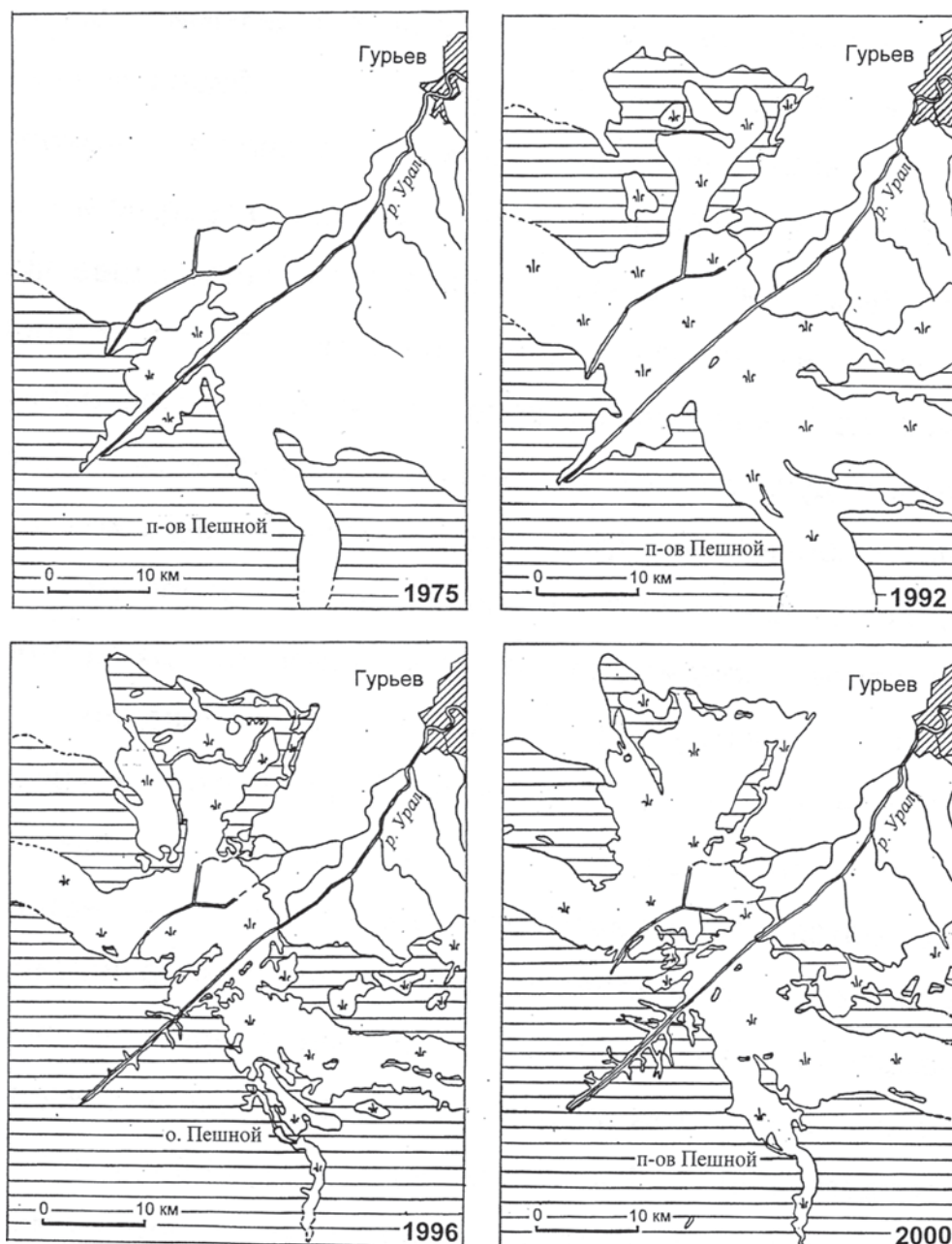


Рис. 1. Серия составленных по разновременным космическим снимкам карт состояния дельты Урала в период подъема уровня моря и начавшейся стабилизации (1976, 1992, 1996, 2000 гг.) (составлены В.И.Кравцовой и И.С.Ермошкиным)

пиксельной структуры изображения можно было передать эти изменения. Именно это и побудило нас обратиться для выявления изменений не к отдельной обработке снимков за разные даты, а к сочленению исходных разновременных изображений, в частности на основе их цветового синтеза.

Чтобы такое сочленение было эффективным, необходимо, чтобы синтезируемые снимки имели простую яркостную структуру, а исследуемые объекты выделялись на них, характеризуясь определенным, присущим им интервалом яркостей.

В нашем случае основные объекты, изменение границ которых нас интересовало – морская акватория и тростниковые заросли – характеризуются наибольшим яркостным контрастом в ближней инф-

ракрасной зоне, где вода изображается темным, почти черным тоном, а тростниковые заросли – светлым, почти белым.

Снимки в ближней инфракрасной зоне за обе даты и служили исходным материалом для получения цветного синтезированного снимка по разновременным изображениям. На рис. 4 представлен такой цветной снимок, синтезированный с красным фильтром для первого срока съемки (2000 г.) и с зеленым и голубым фильтрами для второго срока (2003 г.). Объекты, имевшие низкую яркость в первый срок и высокую во второй (то есть тростник, появившийся в 2003 г. на месте акватории), изобразились на нем ярко-красным цветом, и, напротив, объекты, яркие в 2000 г. (тростник) и темные в 2003 г. (вода), то есть

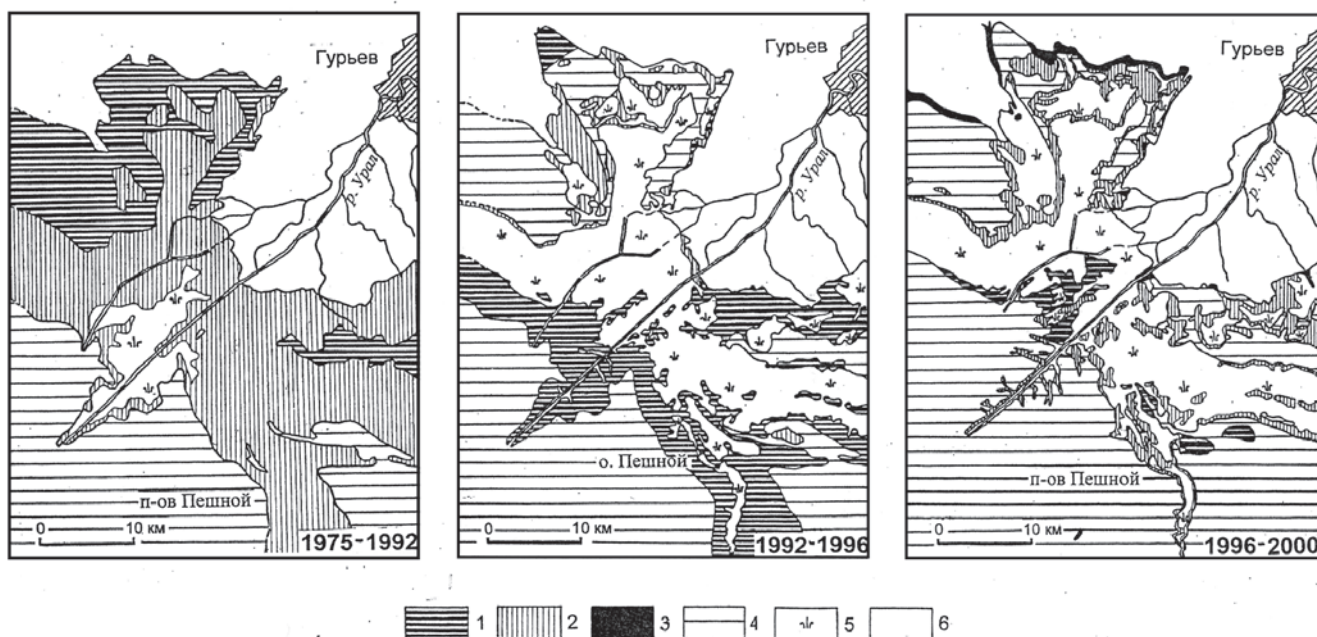


Рис. 2. Серия карт изменений дельты Урала за 1976-1992, 1992-1996, 1996-2000 гг. (составлены В.И.Кравцовой и И.С.Ермошкиным). Изменения: 1 – появление воды на месте тростниковых зарослей (затопление осушки); 2 – появление тростниковых зарослей на месте воды (образование осушки); 3 – появление суши на месте воды и тростника (выдвижение береговой линии). Неизменившиеся объекты: 4 – вода (морская акватория, лагуны, заливы); 5 – тростниковые заросли; 6 – суша

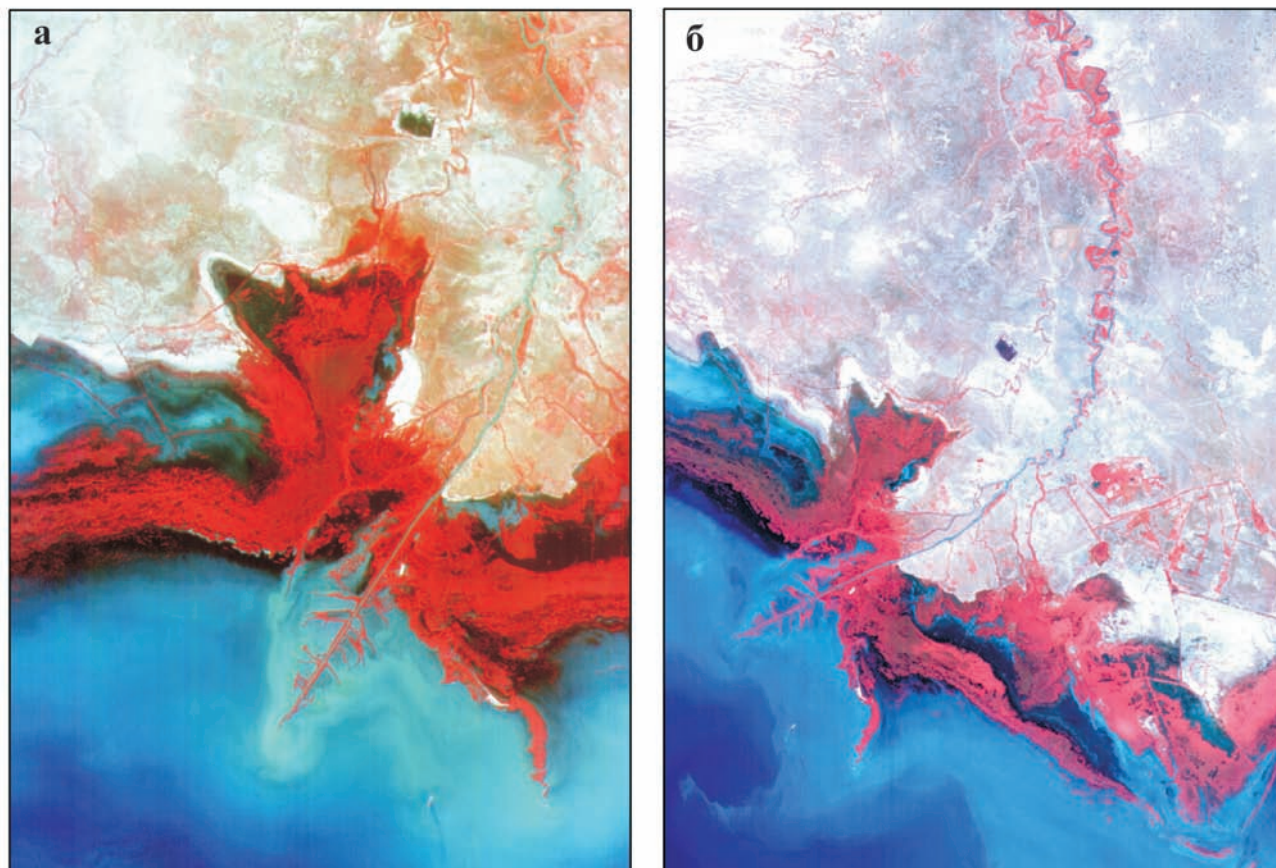


Рис. 3. Космические снимки на район дельты Урала: а – МСУ-Э/Ресурс-О 05.08.2000; б – МСУ-Э/Метеор-3М 30.08.2003

участки затопления тростника водой, выделились ярко-голубым цветом. Полутона изображения на участках суши (на территории сухой части дельты Урала и прилегающих полупустынных равнин) соответствуют небольшому увеличению (розоватый тон) или уменьшению (голубоватый тон) сомкнутости растительности. Поскольку эти изменения сухой части дельты находятся вне сферы интересов при изучении динамики береговой зоны, то эти участки были изъяты из рассмотрения, для чего сухая часть дельты была оконтурена в векторном формате и «вырезана» из исходного изображения, не участвуя в дальнейшем анализе.

Полученный в результате цветной синтезированной снимок непосредственно отражает изменения, произошедшие в береговой зоне дельты – небольшое локальное выдвигание суши, аккумуляцию наносов, подчеркнутую появлением новых участков тростниковых зарослей, затопление части тростниковых зарослей и прибрежной суши, а также изменение состояния тростниковой осушки – сгущение зарослей тростника на одних участках и уменьшение их густоты и увеличение обводненности – на других.

Для получения наиболее четкой картины и отражения самых существенных изменений можно выполнить предварительную подготовку снимка,

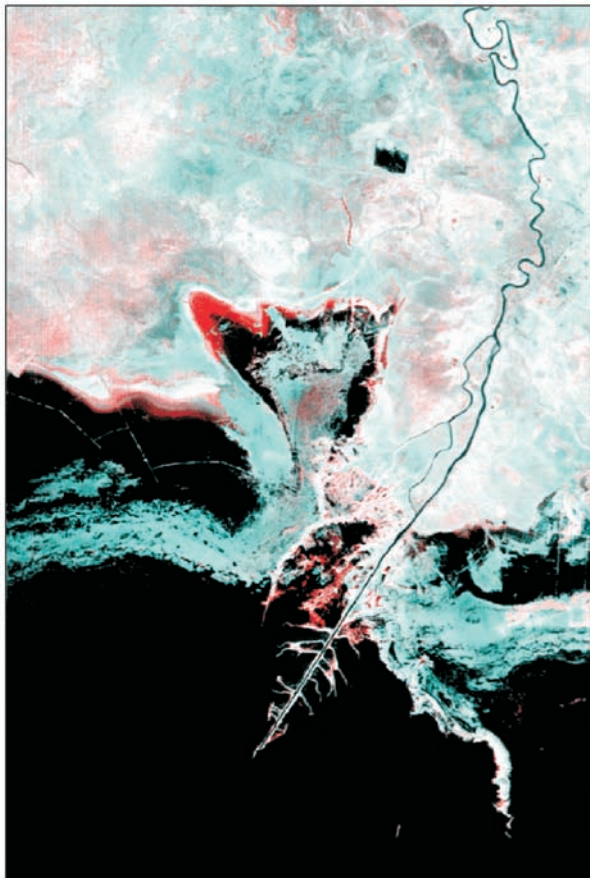


Рис. 4. Цветной снимок, синтезированный из разновременных снимков в ближней инфракрасной зоне (R-2000, G-2003, B-2003)

сильнее разделив по яркости интересующие нас объекты (в данном случае – воду и тростник), отказавшись от отображения других, менее существенных изменений густоты и обводненности тростниковых зарослей. Это может быть достигнуто, например, путем яркостного квантования исходных снимков, используемых для синтеза. Для этого по снимкам в ближней инфракрасной зоне за каждую дату выявляется уровень яркости, по которому вода и тростник разделяются наиболее достоверно. Подбор уровня квантования выполняется путем анализа гистограммы яркости с контролем правильности разделения объектов по этому уровню на основе сравнения квантованного изображения с исходными цветными синтезированными снимками. Сочленение таких квантованных снимков в ближней инфракрасной зоне за обе даты в виде синтезированного изображения с дальнейшим разделением на нем цветом основных объектов дает наиболее четкую картину изменений. На рис. 5 красный цвет придан появлению суши и тростника на месте воды, синий – появлению воды на месте суши и тростника, а неизменяющаяся часть дельты (сохранившиеся заросли тростника и суша) отображается желтым цветом.

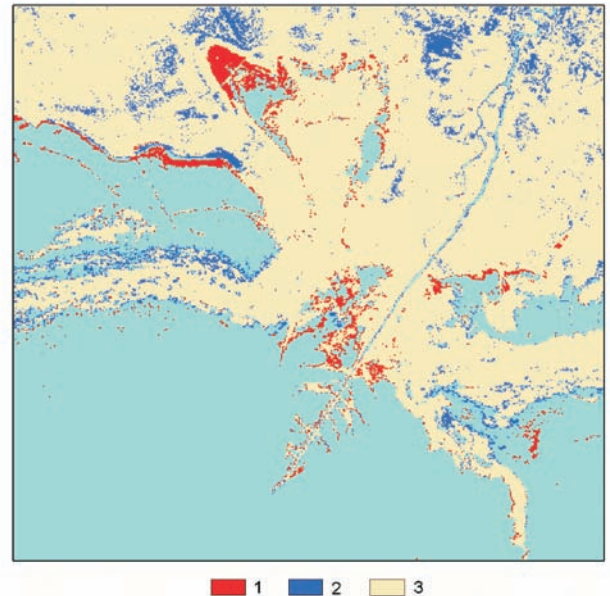


Рис. 5. Результат синтезирования квантованных разновременных снимков в ближней инфракрасной зоне с выделением цветом основных видов изменений: 1 – появление суши и тростниковой осушки на месте воды; 2 – появление воды на месте суши и тростниковой осушки; 3 – суша и тростниковая осушка на оба срока съемки

Для выявления более полной картины изменений – не только появления или исчезновения, но и изменения состояния исследуемых объектов, в данном случае – изменения состояния тростниковых зарослей, их обводнения, уменьшения густоты или напротив увеличения густоты – можно использовать не этот

упрощенный способ, а выполнить классификацию объектов по полнояркостному цветному изображению, синтезированному из разновременных снимков в ближней инфракрасной зоне (см. рис. 4). Здесь применимы наиболее простые методы классификации, поскольку исходными являются яркости лишь двух изображений в одной и той же спектральной зоне, а выделяемый набор объектов достаточно ограниченный. Применима, например, неконтролируемая кластеризация с последующим объединением кластеров при контроле по обоим исходным цветным синтезированным снимкам за две даты, что легко обеспечивается программой ERDAS при использовании модуля Swire. Результат этого варианта обработки приведен на рис. 6. Он и использован для создания карты динамики дельты Урала за период 2000-2003 гг.

Нетрудно догадаться, что такая методика применима и для анализа изображений не за два, а за три срока – в этом случае выполняется синтез трех разновременных изображений в выбранной спектральной зоне, а для анализа синтезированного разновременного снимка можно использовать любые методы классификации.

Процесс и результаты классификации по предложенной методике были сопоставлены с традиционно используемой методикой, при которой вначале выполняется классификация объектов на каждом из разновременных снимков, а затем создается матричное изображение как основа для анализа динамики.

Для классификации каждого из исходных многозональных снимков за обе даты были опробованы все методы автоматизированной классификации, предусмотренные в программе ERDAS Imagine 8.6. Наилучшим для наших снимков оказался один из вариантов неконтролируемой классификации ISODATA, а именно метод кластеризации с использованием средних значений эталонов в модуле Classifier – Unsupervised Classification (ISODATA). Для этого были набраны эталоны. Предусмотрено разделение изображения на 25 кластеров с числом итераций 30 и порогом сходимости 0,98. Цвета кластеров заданы с учетом соотношения объектов на снимках за две даты. Далее проведено объединение кластеров в 4 значимых класса – вода, суша, тростниковые заросли густые, тростниковые заросли разреженные, обводненные. Сравнение каждого классифицированного изображения за обе даты после такого объединения кластеров с исходными цветными синтезированными снимками за те же даты (при использовании модуля Swire) показало, что такое разделение береговой зоны выполнено достаточно достоверно.

Для выявления изменений полученные классифицированные разновременные изображения необходимо сопоставить между собой, для чего используется функция Matrix. При этом создается новое изображение, яркость каждого пиксела которого зависит от сочетания их яркостей на классифици-

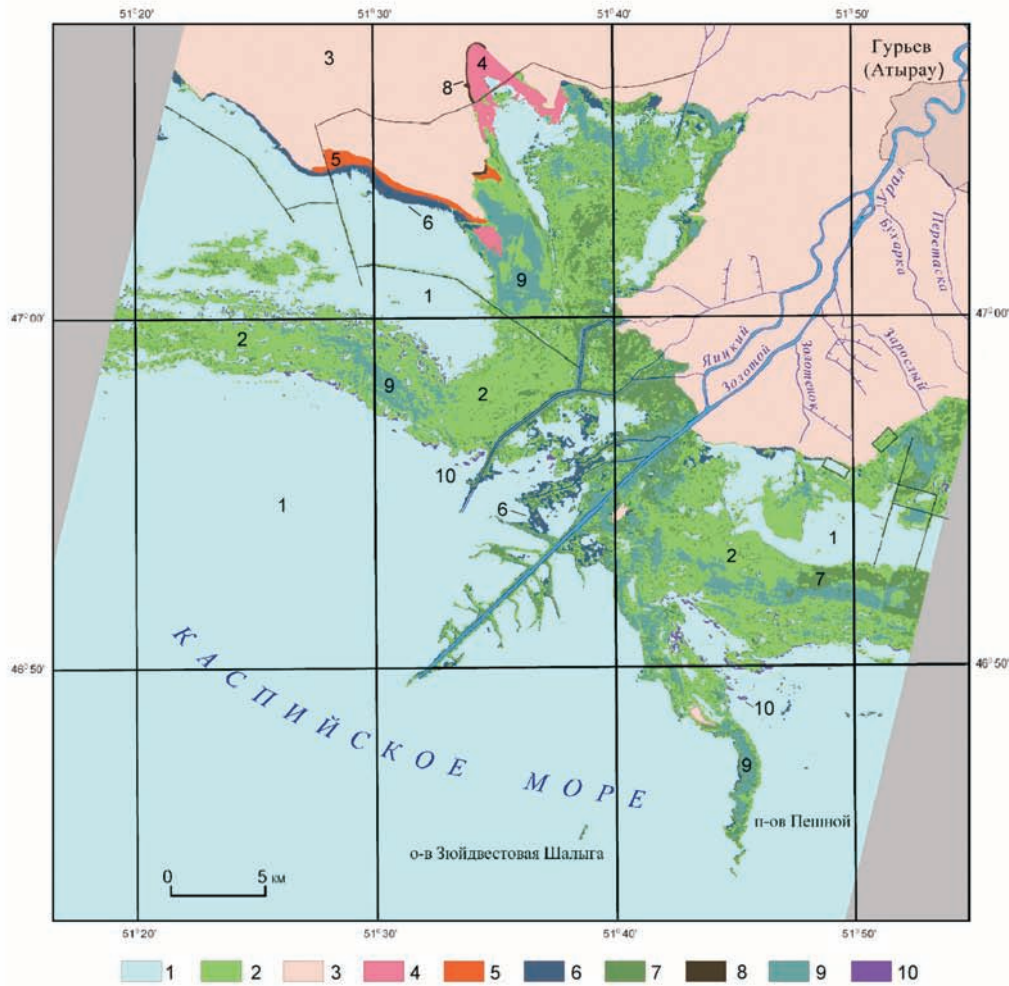
рованных изображениях за две даты. Новые классы можно представить в виде матрицы, входы которой по горизонтали и вертикали соответствуют классам объектов за разные годы наблюдений; по диагонали располагаются объекты, оставшиеся без изменений, а по сторонам от нее – различные виды замещения объектов. Полученная матрица из 16 классов далее подверглась редактированию для исключения незначимых (случайных) классов путем присоединения их к значимым.

Результаты такого матричного совмещения (рис. 7) в пределах береговой зоны оказались очень близкими, практически совпадающими с результатами классификации цветного снимка, синтезированного из разновременных изображений в ближней инфракрасной зоне. Для сухой же части дельты выделено много ложных классов и, как и в предыдущих случаях, ее пришлось исключить из рассмотрения.

Таким образом, картографические результаты классификации объектов береговой зоны, выполненной традиционными и предложенными методами, оказались идентичными. Но процедура классификации традиционными методами намного сложнее и требует больше времени, так как включает много промежуточных операций: кластеризацию каждого из двух снимков с предварительным набором эталонов для нее, объединение классов на каждом из них после кластеризации, создание матрицы изображений, редактирование матрицы (6 операций), в то время как предложенная методика ограничивается цветовым синтезом изображения из разновременных снимков в одной зоне, кластеризацией полученного изображения и объединением классов (3 операции). Упрощенный вариант предлагаемой методики – синтез разновременных изображений, предварительно квантованных по яркости, также ограничивается тремя операциями.

Схемы работы при использовании традиционного метода (рис. 8), предложенного метода классификации снимка, синтезированного из разновременных изображений в одной зоне (рис. 9) и упрощенного, предусматривающего синтез предварительно квантованных разновременных изображений в одной зоне (рис. 10), свидетельствуют о большей простоте, экономичности предлагаемой методики без потери качества создаваемой карты.

Созданная в результате карта динамики дельты Урала за 2000-2003 гг. дополняет составленную ранее серию (см. рис. 2) и позволяет сделать выводы об изменениях в дельте в период относительной стабилизации уровня после его длительного интенсивного подъема. За период наблюдений он вначале (к 2001 г.) снизился на 10 см, а затем, к 2003 г. вновь повысился на ту же величину. В связи с такими небольшими и к тому же разнонаправленными колебаниями уровня произошедшие изменения береговой линии невелики и носят также разнонаправленный характер.



2003 \ 2000	Вода	Тростник разреженный, обводненный	Тростник густой	Суша
Вода	1	—	6	4
Тростник разреженный, обводненный	9	2	7	—
Тростник густой	—	8	2	5
Суша	—	10	—	3

Рис. 6. Карта динамики дельты Урала за 2000-2003 гг. Результат кластеризации цветного снимка, синтезированного из разновременных снимков в ближней инфракрасной зоне с последующим объединением кластеров. I. Неизменившиеся природно-территориальные комплексы: 1 – морские акватории, лагуны, осушки, заливы; 2 – тростниковая осушка, состояние которой не изменилось; 3 – сухостепные равнины дельты. II. Природно-территориальные комплексы, претерпевшие изменения: 4 – появление суши на месте воды (обсыхание заливов, образование соляных корок); 5 – появление суши на месте тростниковой осушки (выдвижение береговой линии); 6 – появление сплошных тростниковых зарослей на месте воды (нарастание рукавов дельты, выдвижение береговой линии в море); 7 – увеличение густоты тростниковых зарослей (уплотнение тростниковой осушки); 8 – появление разреженных тростниковых зарослей на месте суши (появление тростника вдоль берега обсохшего залива); 9 – уменьшение густоты тростниковых зарослей (обводнение тростниковой осушки); 10 – появление воды на месте тростника (затопление участков тростниковых зарослей)

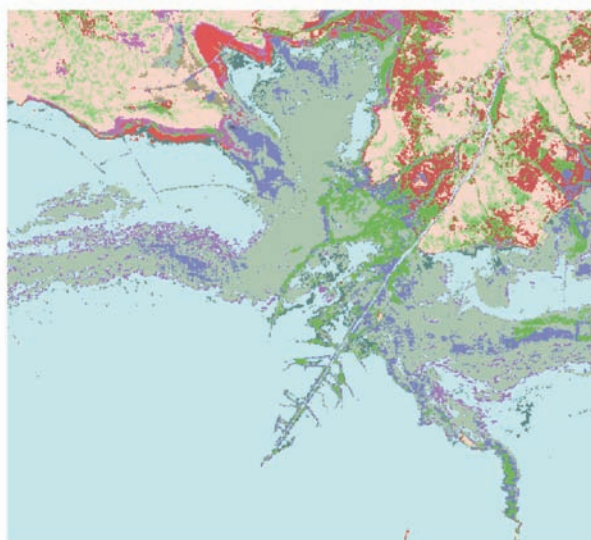


Рис. 7. Результат матричного сочленения материалов классификации методом ISODATA каждого из разновременных снимков (кластеризация на 25 кластеров с учетом средних значений спектральной яркости эталонов при последующем объединении кластеров)

К западу от дельты, на отгороженных дамбами участках на берегу западной лагуны и в кутовой части залива, наблюдается выдвигание береговой линии. По берегу залива оно достигает 1,7 км; на месте высохшего залива образовались участки солончаков с солевой коркой на поверхности. На берегу лагуны исчезли заросли тростника в полосе шириной 200–300 м, но в то же время, вдоль этого участка берега, появились тростниковые заросли на месте воды в полосе шириной около 400 м. Близкий вид изменений (смещение тростниковой осушки в сторону моря) отмечен нами на Калмыцком побережье Каспия в связи с небольшим понижением уровня моря, вызвавшим и понижение зеркала грунтовых вод (Лукьянова, Кравцова, Шуматиев, 2004).

Некоторое выдвигание береговой линии и увеличение зарослей тростника наблюдается в устьевых участках рукавов дельты, по боковым ответвлениям русел, отходящих от Урало-Каспийского морского канала. В противоположность этому, несмотря на снижение уровня моря, отмечается затопление небольших фрагментов тростниковой растительности с внешней стороны осушки и увеличение обводненности тростниковых зарослей в осушке. В заливе между полуостровом Пешным и осушкой произошло затопление узкой полосы тростника и исчезновение нескольких островков. Однако тыловая граница осушки со стороны восточной лагуны характеризуется ярко выраженным сгущением тростниковых зарослей.

Итак, в 2000–2003 гг., когда уровень моря испытывал вначале незначительное опускание, а затем небольшой подъем, в дельте Урала не произошло существенных однонаправленных изменений. Выдвижение береговой линии в сторону моря произошло лишь

на отдельных участках огороженных дамбами заливов, которым соответствуют и поднятия на подводном береговом склоне, а также в устьях рек, где возобновилась аккумуляция речных наносов. В то же время в заливах вдоль границы осушки, напротив, отмечается некоторое обводнение и даже затопление тростниковых зарослей. Отсутствие определенной тенденции в изменении уровня моря привело к относительной стабилизации дельты, когда подъем уровня уже не противостоит процессам дельтовой аккумуляции и они возобновляются.

Работа выполнена по программе ведущих научных школ, проект НШ 1217.2003.5 и гранту РФФИ 04-05-64149.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснова Н.Г. К вопросу о развитии дельты реки Урал. Ученые записки Моск. гос. ун-та. Вып. 16. География. 1937. С. 143–151.
2. Красножон Г.Ф., Мазавина С.С. Гидрологический режим устья р. Урал. – Комплексные исследования Северного Каспия. М.: Наука. 1988. С. 5–41.
3. Кравцова В.И., Илюхина Ю.А. Динамика восточной части устьевой области Терека в период подъема уровня Каспия: картографирование по аэрокосмическим материалам // Вод. Ресурсы. 2002. Т. 29, № 1. С. 49–61.
4. Кравцова В.И., Лукьянова С.А. Трансгрессивные изменения в береговой зоне российского побережья Каспия (по результатам дешифрирования аэрокосмических снимков)//Геоморфология. 1997. №2. С.35–45.
5. Кравцова В.И., Лурье И.К., Илюхина Ю.А. Динамика дельты р. Сулак в условиях подъема уровня Каспия по аэрокосмическим данным (1978–1997) // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2000. №5. С. 53–59.
6. Кравцова В.И., Михайлов В.Н., Ермошкин И.С. Динамика дельты р. Куры // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2003. № 2. С. 66–75.
7. Кравцова В.И., Мяло Е.Г. Изменения растительности в береговой зоне северного Каспия при подъеме уровня моря // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 1998. № 5. С. 49–54.
8. Лукьянова С.А., Кравцова В.И., Шуматиев В.В. Последствия подъема уровня моря на Калмыцком побережье Каспия. – 6 конференция «Динамика и термика вод, водохранилищ и прибрежной зоны морей», 22–26 ноября 2004 г., Москва. М.: ИВП. 2004. С. 421–424.
9. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС. 1997. 413 с.
10. Михайлов В.Н., Кравцова В.И., Магрицкий Д.В., Михайлова М.В., Юсупова М.В. Дельты Каспийских рек и их реакция на изменения уровня моря // вестник каспия. 2004. № 6 (50). С. 60–104.
11. Kravtsova V.I., Lukyanova S.A. Studies of recent changes in the Caspian coastal zone of Russia based on aerial and space imagery // Journal of Coastal Research. Vol. 16. N 1. 2000. P. 196–206.

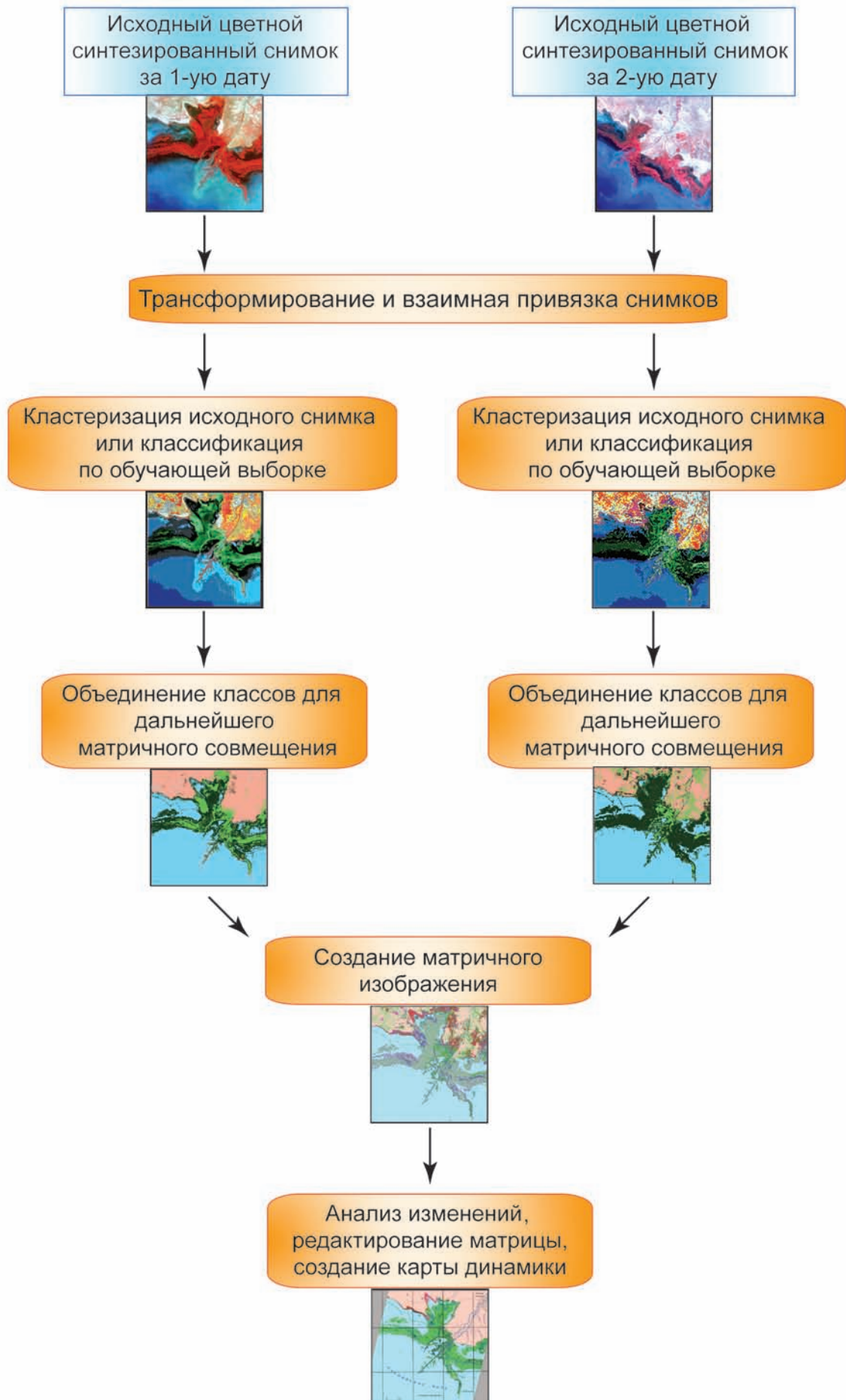


Рис. 8. Схема традиционного метода картографирования динамики дельты по разновременным снимкам

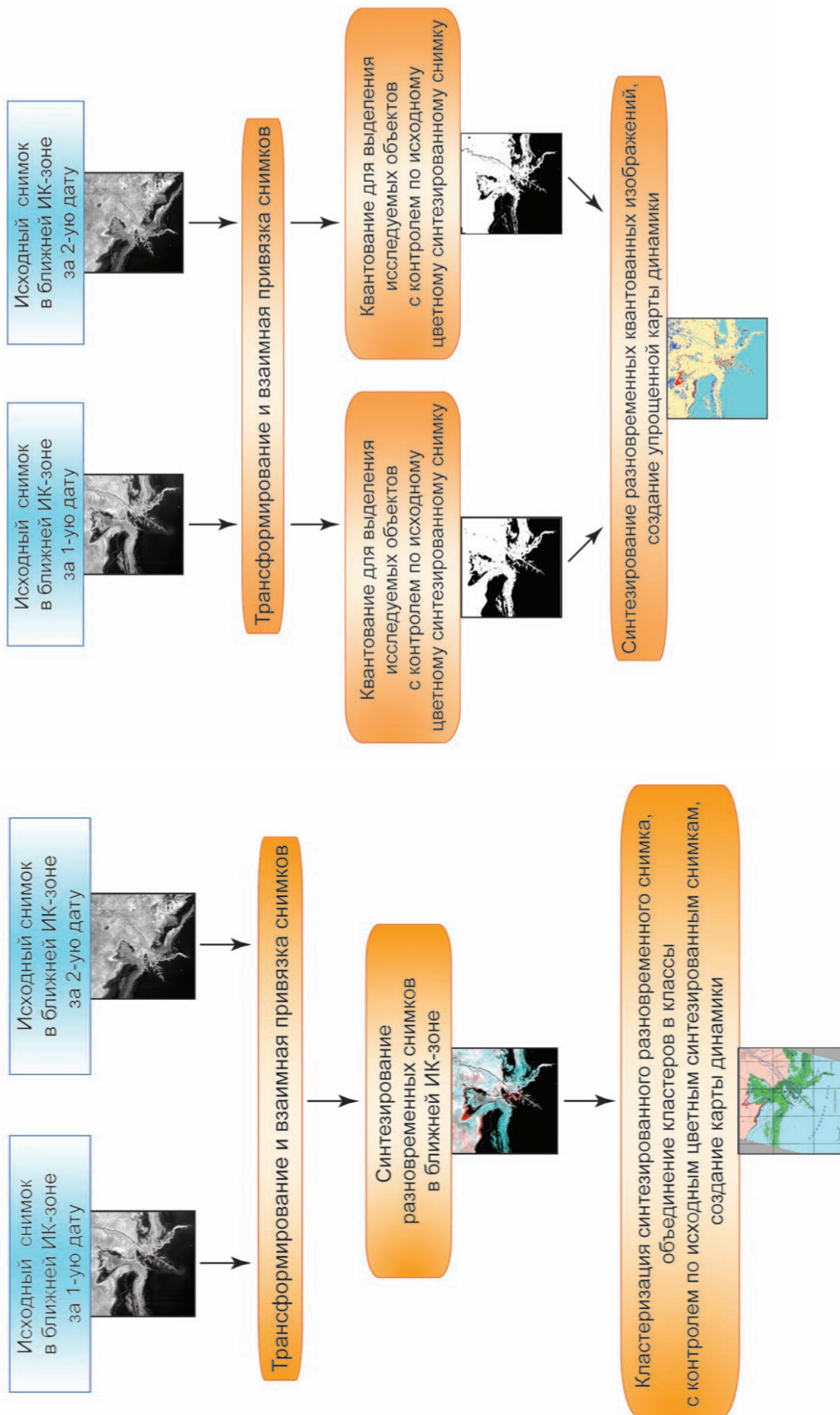


Рис. 9. Схема предлагаемого метода картографирования динамики дельты по разновременным снимкам

Рис. 10. Схема предлагаемого упрощенного метода картографирования динамики дельты по разновременным снимкам