

Е.А. Балдина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОВРЕМЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СНИМКОВ СО СПУТНИКОВ ERS, ENVISAT ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕЗОННЫХ И МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ ВОЛГИ

Введение

В связи с появлением в последнее десятилетие материалов регулярной радиолокационной съемки необходимо определить возможности применения разновременных радиолокационных снимков при изучении динамики природных явлений и разработать соответствующие методики. Среди наиболее интересных динамических объектов – дельта Волги, эволюция которой определяется гидрологическими и геоморфологическими процессами при дополнительном воздействии Каспийского моря, испытывающего значительные колебания уровня. При изучении многолетней динамики экосистем, проявляющейся на космических снимках в первую очередь в изменении растительного покрова, необходима информация о сезонных вариациях растительности, в том числе тех её аспектах, которые не фиксируются в оптическом диапазоне. Значимость сезонных различий при выявлении многолетних изменений сделала актуальной постановку специального исследования, в задачи которого входило предложить методику разделения многолетних изменений береговых экосистем Каспия от сезонных, по многовременным радиолокационным снимкам. Продемонстрирована целесообразность сопоставительного анализа многовременных разносезонных снимков для разграничения сезонных и многолетних изменений.

Работа выполнена в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках совместного проекта с ИПЭ РАН. Материалы радиолокационной съемки предоставлены ИПЭ РАН Европейским космическим агентством.

Используемые материалы

Радиолокационные системы с синтезированной апертурой являются сегодня одним из важнейших средств дистанционного исследования Земли и ее природных ресурсов. Среди наиболее известных

преимуществ радиолокационной съемки – ее независимость от погодных условий и времени суток, способность отображать физические характеристики поверхности (влажность, шероховатость и т.п.) и проникать вглубь, предоставляя данные о свойствах верхнего слоя почвенного и растительного покрова. Однако, использование материалов радиолокационной съемки в географо-экологических исследованиях недостаточно широко, что обусловлено слабой изученностью особенностей отражения радиоволн от различных поверхностей.

При содействии Института Радиоэлектроники РАН в лаборатории аэрокосмических методов собран небольшой архив радиолокационных снимков на различные участки дельты Волги. Для проведения данного исследования были отобраны разносезонные снимки разных лет, охватывающие хорошо изученный район: западную часть дельты Волги, в пределах которой расположен один из участков Астраханского биосферного заповедника.

Сведения об основных анализируемых материалах – радиолокационных снимках со спутников ERS-2 и ENVISAT за разные годы, полученные радарными с синтезированной апертурой SAR и ASAR, приведены в табл. 1.

Все снимки выполнены в С-диапазоне – длина волны 5,6 см, при вертикально согласованной поляризации (VV). Для сопоставления и синтеза все снимки приведены к одинаковому размеру пиксела – 12,5 м и пространственно скоординированы средствами ГИС-пакета ILWIS (ITC, the Netherlands). Территориальный охват снимков, полученных в разное время, несколько различается, поэтому цветные многовременные снимки часто охватывают лишь часть изучаемой территории. Цветные многовременные радиолокационные изображения получены при одинаковых условиях цветового синтеза: красный цвет (R) соответствует наиболее раннему снимку, зеленый (G) – соответствует промежуточному сроку, синий (B) – наиболее позднему.

Материалы радиолокационной съемки, использованные в работе

Год съемки	Спутник, аппаратура	Пространственное разрешение	Даты съемки			
1995	ERS-2, SAR	30 м		26 июня		
1999	ERS-2, SAR	25 м	12 мая	16 июня	2 июля	29 сентября
2003	ENVISAT, ASAR	12,5 м			30 июля	8 октября
2004	ENVISAT, ASAR	12,5 м		9 июня		

В качестве дополнительных материалов, необходимых для распознавания объектов и заменяющих «наземную правду», использовались снимки того же района в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, полученные с разных спутников и различной аппаратурой, результаты изучения и картографирования растительности Астраханского заповедника (Живогляд, 1970, Балдина, Лабутина, 1997, Кучерявенкова и др., 2001), литературные источники (Астраханский, 1991 и др.).

Характеристика района исследований

Дельта Волги – одна из наиболее крупных дельт мира, ее надводная часть занимает площадь более 10 тысяч кв. километров. Она представляет собой равнину с густой сетью русловых водоемов и множеством островов. Как многие дельты, она относится к числу особо динамичных природных объектов.

Анализируемая по многовременным снимкам территория площадью 30 x 65 км расположена в низовьях западной части дельты Волги (рис. 1). Это – сравнительно молодая часть дельты, в которой взаимодействуют речные и морские факторы дельтообразования. Центральную часть территории, охваченной снимком, занимает Дамчикский участок Астраханского заповедника.

В соответствии с принятой схемой физико-географического районирования дельты (Белевич..., 1962) в пределах изобразившейся на снимке территории с севера на юг выделяются участки нижней зоны надводной дельты, култушной зоны, островной зоны авандельты. Для каждой из этих зон характерна своя четко выраженная сезонная динамика.

Нижняя зона надводной дельты, представленная в самой северной части снимка – аллювиальная равнина, прорезанная протоками, делящими ее на острова. Прирусловые повышенные части островов покрыты галерейными ивовыми лесами, а внутри-островные ровные пониженные участки заняты разнотравно-злаковыми и разнотравно-тростниковыми

лугами. В этой зоне на достаточно возвышенных островах находятся обрабатываемые сельскохозяйственные поля; некоторые участки выкашиваются. Для этой зоны характерна относительно небольшая сезонная изменчивость. Изменения на территории, которые можно увидеть и на космических снимках, связаны главным образом с прохождением половодья и, соответственно, вариациями содержания влаги в почве, а также с обработкой сельскохозяйственных земель, выкашиванием лугов и сменой их аспекта. С середины мая до октября границы растительных сообществ остаются практически неизменными.

Култучная зона, для которой характерны слабoproточные заливы-култуки с небольшими островами, занимает на рассматриваемой территории небольшую площадь. Основные виды растительности култучной зоны – узкие полосы ивовых лесов и густые тростниковые заросли. На разносезонных снимках можно наблюдать зарастание култуков – появление сезонной водной растительности.

Островная зона авандельты здесь представлена двумя большими осушными островами: полуостров Макаркин (который стал полуостровом в период максимальной регрессии моря) и остров Зюдев, заросшие тростником и по краям рогозом. Тростник южный имеет наибольшее распространение и в култушной, и в островной зоне, образуя сплошные непроходимые заросли – крепи, высотой местами до 5 м. Осушные морские острова не имеют четких границ, так как сплошные тростниковые заросли «спускаются» с суши на прилегающую часть акватории, постепенно переходят в куртинно-кулисные и куртинные заросли. Летом, с появлением сезонной растительности, острова как бы увеличиваются по площади.

Между островами авандельты и в зоне открытой авандельты особое значение имеет водная растительность – настоящая водная и земноводная. К последней относятся высокотравные сообщества (камыш озерный, тростник южный, рогоз) и низко-

травные сообщества (лотос, водяной орех, ежеголовник, кувшинка и др.). Существенно, что тростник растет на глубинах до 1,5-2 м, возвышаясь над водой на высоту до 2 м. Его заросли между островами аванделыты образуют куртины – небольшие «островки» округлой формы, которые при понижении уровня моря срастаются с соседними, в результате чего получаются острова большей площади. Для этой зоны характерна сильно выраженная сезонная изменчивость аспекта и границ распространения водной растительности, которая появляется на поверхности воды только к концу июня, что необхо-

димо принимать во внимание при анализе многовременных снимков (Балдина, Лабутина, 1997).

В центральной части снимка виден Волго-Каспийский канал, отмеченный приканальными островами, которые большей частью заняты тростниковыми зарослями.

Охарактеризованные выше особенности территории позволяют выделить следующие основные объекты изучения и дешифрирования на участке западной части дельты Волги, изменения в состоянии которых могут найти отражение на многовременных снимках (рис. 1):

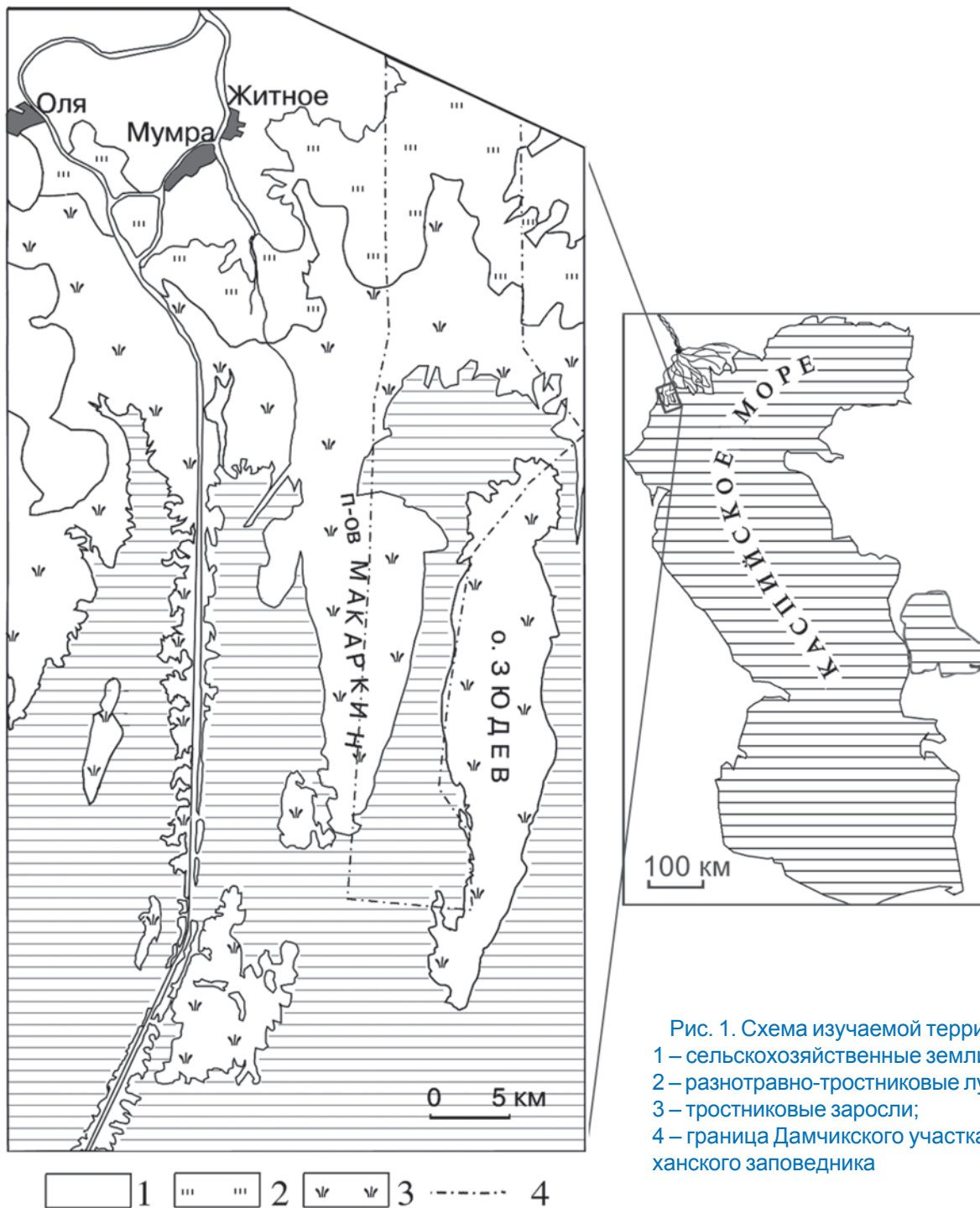


Рис. 1. Схема изучаемой территории:
 1 – сельскохозяйственные земли;
 2 – разнотравно-тростниковые луга;
 3 – тростниковые заросли;
 4 – граница Дамчикского участка Астраханского заповедника

- сельскохозяйственные земли (поля, сенокосы);
- разнотравно-тростниковые луга в нижней зоне надводной дельты;
- тростниковые заросли в култушной зоне и на островах;
- морская акватория с плавающей сезонной растительностью и куртинами тростника и рогаза.

Методика и результаты сопоставительного анализа снимков

Основой метода исследования динамики природных объектов по многовременным снимкам, фиксирующим состояние объектов на разные даты, является их сопоставление. Компьютерная реализация метода направлена на обеспечение точного пространственного совмещения материалов и извлечение из них динамической информации.

Важным условием проведения сопоставления является точное пространственное совмещение и яркостная идентичность снимков. Это необходимо для минимизации возможности появления ложных классов изменений за счет неточностей привязки и различных параметров сенсора и условий съемки.

Свойства радиолокационных изображений: отображение моментального состояния местности – увлажненности земных покровов, сезонных изменений растительности, ветрового волнения водных поверхностей и т.п. – осложняет их использование для изучения многолетней динамики территории. Дополнительным свойством, усложняющим как попиксельную обработку снимков, так и изучение динамики по радиолокационным снимкам, является наличие спекл-шума, т.е. случайных изменений яркости пиксела, вызванное интерференцией сигналов от различных точек объекта. Наличие спекл-шума проявляется на изображении в виде хаотичного чередования пикселов со значительно различающейся яркостью. Несмотря на то, что разработано много методов подавления спекл-шума, их применение малоэффективно в тех случаях, когда речь идет о выявлении достаточно тонких различий природных объектов и при необходимости одновременного сохранения высокого пространственного разрешения изображения. В этом случае наиболее целесообразно применение визуального анализа снимков.

Цветовой синтез разновременных изображений оказывается эффективным методом выявления изменений, поскольку объекты, претерпевшие изменения, имеют на таких синтезированных снимках различные, нередко яркие и хорошо выраженные цвета, в то время как не изменившиеся объекты изображаются серыми, темными или белесоватыми тонами. Например в пределах изучаемой терри-

тории, практически при любом наборе синтезируемых многовременных снимков участки, занятые тростниковыми зарослями, имеют почти одинаковый яркий светлый тон, поскольку густые заросли тростника дают высокий уровень отраженного сигнала, т.к. они характеризуются значительной плотностью отражателей в верхнем рассеивающем слое как в разные сезоны года, так и на более длительных отрезках времени.

Цветовой синтез разносезонных радиолокационных снимков (рис. 2а), полученных в течение одного вегетационного периода 1999 г. (в мае, июне и сентябре), позволяет наглядно отобразить основные виды изменений, происходящих на изучаемой части дельты Волги за вегетационный период. Оттенками синих цветов на многовременном снимке изобразилась появившаяся за вегетационный период водная растительность. Это, главным образом, растения с плавающими листьями и наземно-водные растения, такие как лотос, водяной орех, кувшинка, рогоз и др. Известно (Живогляд, 1970), что в этом районе появление растений на поверхности воды начинается в мае-июне, причем по-разному на разных участках дельты в зависимости от близости к устьям проток. Так, на прибрежных участках (1) развитие водных растений в мае-начале июня запаздывает по сравнению с участками у южной оконечности осушенных островов из-за поступления более холодных паводковых вод: пятна имеют темный тон на майском и июньском снимках. Сравнение трех увеличенных фрагментов разносезонных снимков (рис. 2б) показывает, что сезонная водная растительность хорошо заметна только на последнем, сентябрьском снимке, что и обеспечивает интенсивно синий цвет этих участков на синтезированном многосезонном снимке. Водная растительность у южной оконечности осушенных островов (2) появляется несколько раньше и заметна местами и на июньском снимке, благодаря чему на многовременном снимке она изображается более светлыми голубыми оттенками.

Сезонные изменения, происходящие в зоне надводной дельты, можно наблюдать лишь на небольшом ее участке в северной части снимка. Интенсивно синий цвет, близкий к цвету появившейся за сезон водной растительности, имеют и участки суши (3). Однако здесь этот цвет обусловлен тем, что эта часть дельты, весной и в начале лета оказывается залитой водой в связи с прохождением половодья и имеет низкую рассеивающую способность, свойственную водным поверхностям в спокойном состоянии, а к сентябрю эти участки оказываются покрытыми густой травянистой растительностью и характеризуются высокими значениями радиолокационной яркости. Зеленовато-голубоватый цвет участков суши (4) характерен для тех участков, кото-

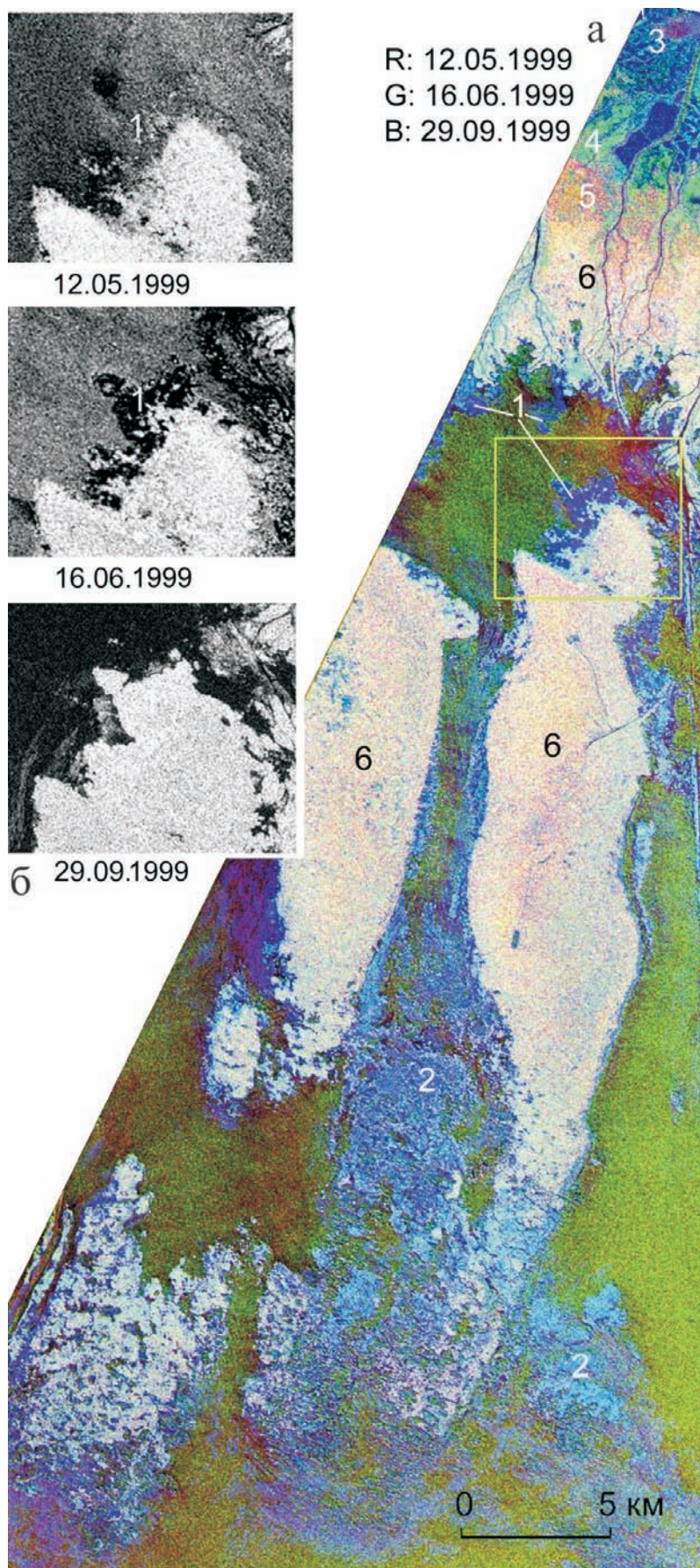


Рис. 2. а – цветной синтезированный снимок, полученный по разносезонным радиолокационным снимкам 1999 г. со спутника ERS-2 (SAR), на западную часть дельты Волги в варианте синтеза: R – 12 мая, G – 16 июня, B – 29 сентября; цифровые обозначения объясняются в тексте; б – фрагменты разновременных снимков, использованных для синтеза

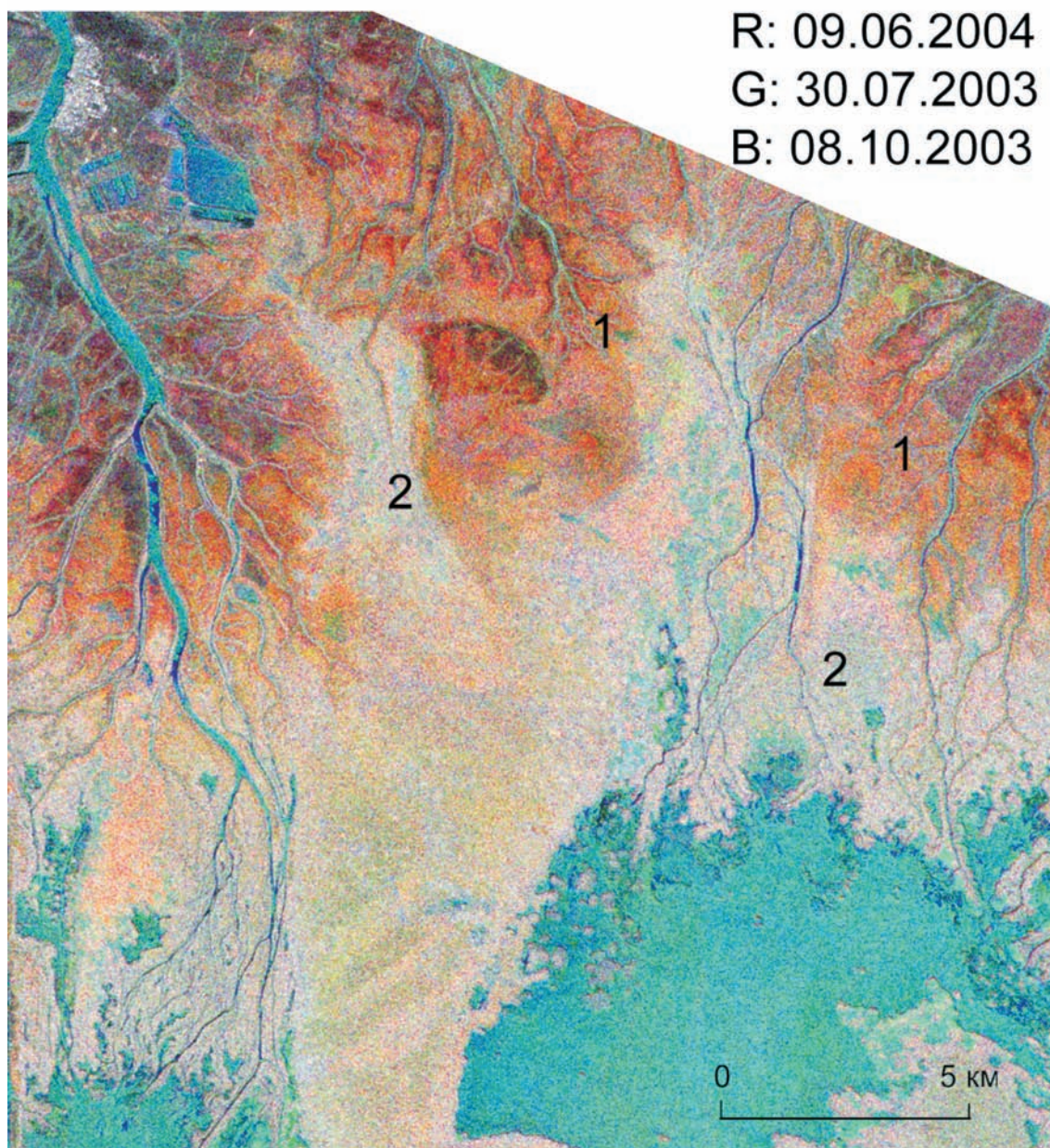


Рис. 3. Цветной синтезированный снимок, полученный по разносезонным радиолокационным снимкам 2003/04 гг. со спутника ENVISAT (ASAR), на северную часть изучаемой территории в варианте синтеза: R – 9 июня 2004 г., G – 30 июля 2003 г., B – 8 октября 2003 г. (цифровые обозначения объясняются в тексте)

рые были залиты водой в мае, а в июне оказались покрыты растительностью, дающей высокое значение сигнала. Оттенки красновато-оранжевых тонов (5) свидетельствуют о высокой радиолокационной яркости участков в мае и постепенном ее понижении к июню и сентябрю: вероятнее всего, это объясняется активной вегетацией и цветением занимающих эти участки разнотравно-тростниковых лугов, которое приходится на начало летнего периода; к осени состояние лугов ухудшается и, соответственно, снижается их радиолокационная яркость на снимке. Тростниковые заросли – крепи – (6) изображаются яркими почти белыми тонами как на суше, так и на островах, что, как было отмечено выше, объяс-

няется их одинаково высокой рассеивающей способностью в любой сезон.

Другой характер сезонных изменений в нижней зоне надводной дельты можно наблюдать на рис. 4, представляющем цветовой синтез разносезонных снимков 2003/2004 гг. В данном случае мы используем снимок от 9 июня 2004 г. как наиболее ранний за вегетационный период, окрашивая его в красный цвет, а летний и осенний снимки 2003 г., соответственно в зеленый и синий цвета. На этом многовременном снимке в зоне разнотравно-тростниковых лугов практически нет зеленых и голубых тонов, которые свидетельствовали бы о появлении растительности на затопленных в половодье участках, поскольку в июне 2004 г. эта территория не была



Рис. 4. Цветовой синтез радиолокационных снимков разных лет, полученных в близкие календарные сроки: R – 26 июня 1995 г., G – 16 июня 1999 г., B – 9 июня 2004 г. (цифровые обозначения объясняются в тексте)

затоплена. Здесь преобладают красновато-коричневые тона (1), которые указывают на ослабление радиолокационной яркости растительности от июня к октябрю, что, как отмечалось выше, связано с естественной сменой аспекта лугов к осени – уменьшением высоты травостоя и его изреживанием.

Тростниковые заросли (2) имеют неизменно высокую радиолокационную яркость во все сезоны, что обеспечивает им белесоватый цвет и на этом снимке.

Таким образом, сопоставление двух изображений, синтезированных из разносезонных снимков (рис. 2 и рис. 3), позволяет наблюдать два основных

процесса, происходящих в зоне разнотравно-тростниковых лугов надводной дельты в течение вегетационного периода: от мая к июлю – появление луговой растительности на затопленных участках, и, соответственно, увеличение яркости на снимках, а от июля к осени – увядание и уменьшение высоты растительности, которое дает ослабление сигнала и понижение яркости на снимках.

Выявленные особенности сезонных различий следует учитывать и при выборе снимков для анализа многолетних изменений.

Цветовой синтез снимков разных лет, полученных в близкие календарные сроки. Из табл. 1 видно, что наиболее пригодными для одновременного анализа с целью выявления многолетней динамики являются снимки, полученные в июне 1995, 1999 и 2004 г., поскольку они относятся к одному календарному месяцу и должны отображать близкое сезонное состояние растительности. Цветное изображение, синтезированное из этих снимков по принятому правилу: R – красный цвет для наиболее раннего снимка (26 июня 1995 г.), G-зеленый – для промежуточного (16 июня 1999 г.), B – синий для наиболее позднего (9 июня 2004 г.) приведен на рис. 4. На этом снимке наибольшее разнообразие цветовых оттенков приходится на водную поверхность, однако это разнообразие передает лишь различия ветрового волнения в разные даты съемки. На радиолокационном снимке, сделанном при ветре, шероховатость морской поверхности, обусловленная ветровым волнением, настолько повышает яркость изображения, что ее трудно отличить от суши. Тростниковые заросли (1) как в зоне надводной дельты, так и на островах в основной массе имеют одинаково высокую рассеивающую способность в разные годы, обеспечивающую им яркие белесые тона на этом многовременном снимке. Разнотравно-тростниковые луга (2) также имеют белесоватый тон, поскольку снимками этих сроков захвачен период максимального развития луговой растительности.

Хорошо видно, что пятна, соответствующие зарослям лотоса и другой сезонной водной растительности (3, 4), здесь имеют оттенки от красновато-фиолетовых в авандельте до оранжевых вокруг осушенных островов. Изображение сезонной растительности в такой цветовой гамме означает, что состояние островной зоны авандельты в выбранные для анализа сроки было различным: т.е. растительность, хорошо заметная на снимке 26 июня 1995 г. и местами на снимке 16 июня 1999 г., практически отсутствует на снимке 9 июня 2004 г. Снимок 9 июня 2004 г. показывает островную зону еще в весеннем аспекте, а снимком, полученным 26 июня 1995 г., захвачена ситуация, относящаяся уже к летнему периоду. Поэтому использовать эти июньские сним-

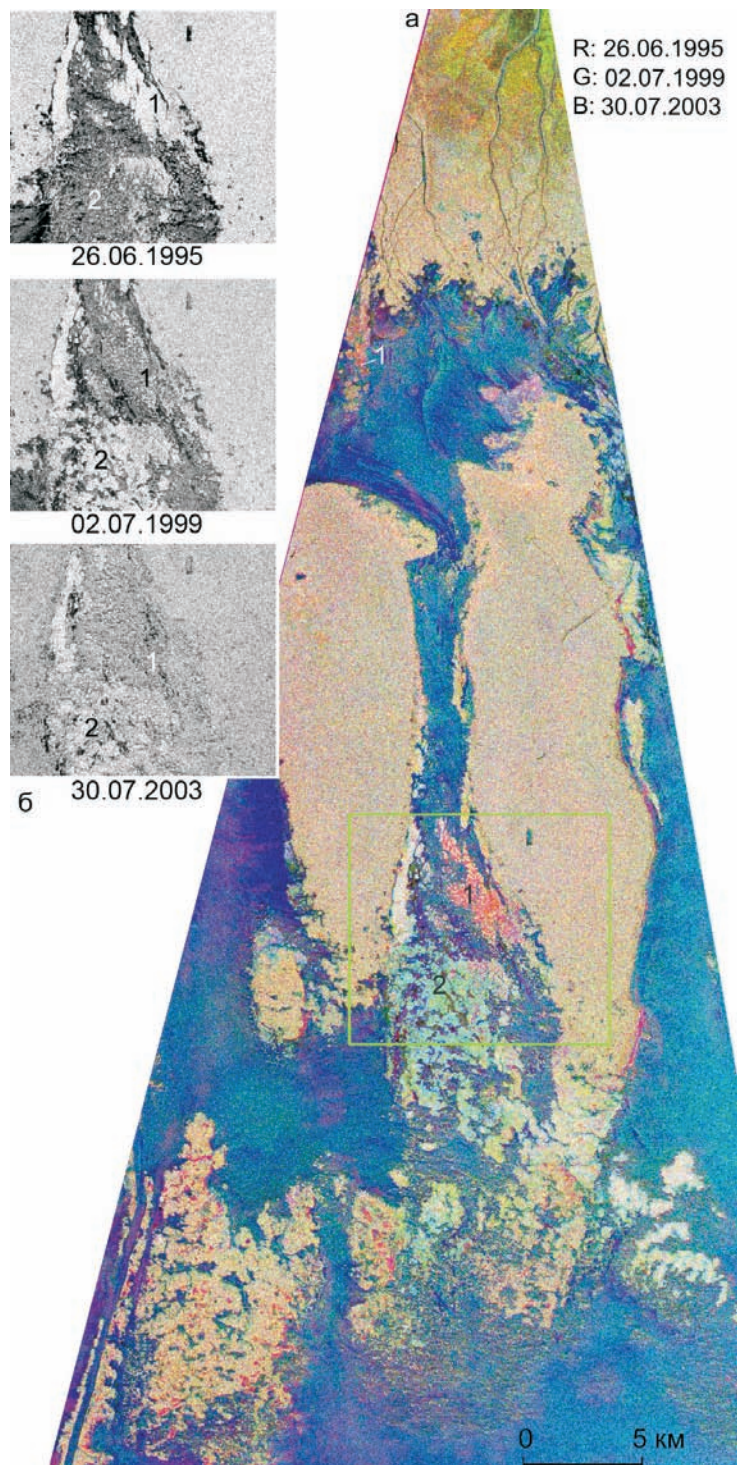


Рис. 5.: а – Цветовой синтез радиолокационных снимков разных лет, отображающих идентичное сезонное состояние местности: R – 26 июня 1995 г., G – 2 июля 1999 г., B – 30 июля 2003 г.; б – фрагменты исходных разновременных снимков

ки для изучения изменения за 1995-1999-2004 гг. было бы неправильно, поскольку они отражают разное сезонное состояние растительности.

Для более определенного разграничения сезонных и многолетних изменений в пределах рассматриваемого участка необходимо сопоставить многовременные снимки, отображающие территорию в сроки, более соответствующие идентичному сезонному состоянию.

Цветовой синтез снимков разных лет, отображающих идентичный сезонный аспект. Наиболее близкий сезонный аспект островной зоны дельты Волги отображают снимки, полученные в середине лета: 26 июня 1995 г., 2 июля 1999 г., 30 июля 2003 г. Рис. 5 а представляет синтез этих снимков, выполненный по тому же правилу (красный цвет для наиболее раннего снимка, зеленый – для промежуточного, синий – для наиболее позднего). Этот снимок позволяет уви-

деть изменения, которые произошли в зарастаемости межкостровного пространства дельты между 1995 и 2003 гг. Яркие оранжево-красные пятна (1) соответствуют таким участкам, где в 1995 г. была развита сезонная водная растительность, а в 1999 и/или в 2003 г. она отсутствовала или была значительно более разреженной. Это означает сокращение площадей сезонной водной растительности, такой как лотос, водяной орех и др. Наиболее заметное сокращение зарослей лотоса показывает выделенный на рис. 5 увеличенный фрагмент (рис. 5б). Светло-голубыми оттенками (2) изобразились участки, где растительность отсутствовала в 1995 г., появилась в 1999 г., хорошо разрослась к 2003г.; это – разросшиеся куртины тростника, изменение состояния которых хорошо прослеживается на приведенных увеличенных фрагментах разновременных снимков.

Таким образом, анализ цветных синтезированных многовременных снимков, за разные даты, относящихся к разным сезонам позволяет разделить сезонные и многолетние изменения и выбрать для изучения многолетних снимки, отражающие идентичное сезонное состояние.

Заключение

Работа с радиолокационными снимками со спутников ERS, Envisat на территорию западной части дельты Волги, полученными в разные сроки 1995-2004 гг., позволила дать предложения по методике использования разновременных снимков и выявить изменения экологической ситуации.

В методическом плане продемонстрировано, что цветовой синтез разновременных радиолокационных снимков является эффективным методом выявления изменений береговых зон с тростниковыми зарослями и сезонной водной растительностью. Установлено, что при изучении многолетних изменений по снимкам необходимо обеспечить выбор материалов, представляющих идентичное сезонное состояние исследуемых объектов. При использовании радиолокационных снимков для изучения динамики объектов, расположенных вблизи границы вода-суша, помимо обеспечения сезонной идентичности, необходим выбор снимков с изображением водной поверхности в спокойном состоянии.

Может быть предложена следующая схема изучения многолетних изменений по многовременным радиолокационным снимкам на основе цветового синтеза разновременных снимков:

- 1) выявление различий в состоянии объектов, обусловленных быстропротекающими процессами (увлажнение, ветровое волнение и т.п.) – при наличии снимков с интервалом в несколько дней;

- 2) выделение участков с однотипным ходом сезонных изменений (например, островная зона и зона надводной дельты) и выявление сезонных различий местности по разновременным снимкам одного года;
- 3) выявление многолетних изменений на основе анализа снимков, полученных в разные годы и отражающих идентичное сезонное состояние местности.

Проведенный сопоставительный анализ разновременных радиолокационных снимков 1995-2004 г. позволил охарактеризовать изменения экологической ситуации в западной части дельты Волги за этот период. Следует отметить высокую стабильность тростниковых зарослей на осушенных островах и по краю надводной дельты. В зоне островной авандельты отмечается некоторое разрастание тростниковых зарослей и увеличение их плотности и одновременно уменьшение зарослей лотоса и другой сезонной водной растительности на отдельных участках. Эти изменения свидетельствуют о влиянии на природные экосистемы относительно стабилизировавшегося высокого уровня Каспийского моря.

Работа проводилась в рамках проекта «Университеты России» 08.02.584 и проекта ENVISAT AO549 «Observation of Caspian Coastal area evolution caused by rise of the sea level».

ЛИТЕРАТУРА

1. Астраханский заповедник. М.: Агропромиздат, 1991. – 191 с.
2. Белевич Е.Ф. Районирование дельты Волги// Труды Астраханского заповедника. Вып. 8. Астрахань, Изд-во «Волга». 1962 г., – с. 401-421.
3. Балдина Е.А., Лабутина И.А. Методика картографирования дельтовой растительности на основе аэрокосмических снимков и геоинформационных технологий // Вестник Моск. ун-та, сер. 5, География 1997, 3, с. 57-62.
4. Живогляд А.Ф. Сезонная динамика Астраханского заповедника // Труды Астраханского заповедника. Вып. 13, Астрахань, Изд-во «Волга», 1970 г., с. 143-167.
5. Кучерявенкова И.Л., Захаров А.И., Кравцова В.И., Балдина Е.А., Лабутина И.А. Совместное использование многовременных данных радиолокатора с синтезированной апертурой и оптических данных для классификации растительных покровов северо-западного Прикаспия // Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами. Всероссийская научная конференция. Муром: 2001, с. 47-51.