

УДК 528.88:911.52 (571.15)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(104-115)

Д. В. ЧЕРНЫХ*, ******, **Р.Ю. БИРЮКОВ***, **Д.В. ЗОЛОТОВ***, **Д.К. ПЕРШИН***, ******

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия, chernykh@mail.ru, rubiryukov@mail.ru, zolotov@iwep.ru, dmitrypersh@gmail.com

**Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61, Россия, chernykh@mail.ru, dmitrypersh@gmail.com

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЛАНДШАФТОВ
ВОДОСБОРНЫХ БАСЕЙНОВ АЛТАЙСКОГО РЕГИОНА В ПОСЛЕДНИЕ 40 ЛЕТ**

На основе данных дистанционного зондирования с применением геоинформационных методов проведен анализ пространственно-временной динамики наземных покровов (land covers) репрезентативных водосборных бассейнов Алтайского региона (Алтайский край и Республика Алтай). В качестве ключевых территорий использованы: для бессточной области Обь-Иртышского междуречья и левобережья Верхней Оби — смежные бассейны оз. Горькое, рек Касмалы и Барнаулки на Приобском плато (Алтайский край); для правобережья Верхней Оби — бассейн р. Большой Речки на Бийско-Чумышской возвышенности и древних обских террасах (Алтайский край); для низкогорий и среднегорий Северо-Западной провинции Русского Алтая — бассейн р. Белой (Алтайский край); для низкогорий и среднегорий Северной и Северо-Восточной Алтайских провинций — бассейн р. Маймы (Республика Алтай). Для рассматриваемой территории адаптирован алгоритм, позволяющий анализировать актуальное состояние наземных покровов и выделять основные векторы их преобразования. Использована серия разновременных космических снимков Landsat для трех временных срезов. Выявлено, что равнинные бассейны степной и лесостепной зон характеризуются меньшей амплитудой изменений наземных покровов по сравнению с горными. Для бессточной области Обь-Иртышского междуречья и левобережья Верхней Оби наиболее показательны снижение доли пахотных угодий и высокая естественная динамика водных объектов. Для правобережья Оби характерна наименьшая динамика всех типов наземных покровов и значима динамика искусственных водных объектов. В горных бассейнах произошло значительное снижение доли лесопокрытых площадей преимущественно в пользу естественных травяных сообществ в результате хозяйственной деятельности. Кроме того, показано, что направления изменений и переходов различных типов наземных покровов могут существенно различаться для разных групп ландшафтов.

Ключевые слова: наземные покровы, дистанционное зондирование, Алтайский край, Республика Алтай, группы ландшафтов, матрицы переходов.

D.V. CHERNYKH*, ******, **R.YU. BIRYUKOV***, **D.V. ZOLOTOV***, **D.K. PERSHIN***, ******

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 656038, Barnaul, ul. Molodezhnaya, 1, Russia, chernykh@mail.ru, rubiryukov@mail.ru, zolotov@iwep.ru, dmitrypersh@gmail.com

**Altai State University, 656049, Barnaul, pr. Lenina, 61, Russia, chernykh@mail.ru, dmitrypersh@gmail.com

**SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF LANDSCAPES OF PLAIN AND MOUNTAIN CATCHMENTS
IN THE ALTAI REGION DURING THE LAST 40 YEARS**

The spatiotemporal dynamics of land covers of representative catchments of the Altai region (Altai Krai and Republic of Altai) was analyzed using remote sensing data and GIS techniques. The following key areas were used: the adjacent basins of Lake Gor'koe and the Kasmala and Barnaulka rivers on the Ob Plateau (Altai Krai) were used for the inland drainage area of the Ob-Irtysh interfluvium and the left bank of the Upper Ob; the Bol'shaya Rechka basin on the Biisk-Chumysh Upland and ancient Ob terraces (Altai Krai), for the right bank of the Upper Ob; the Belaya river basin (Altai Krai) for the low mountains and middle mountains of the Northwestern province of Russian Altai, and the Maima river basin (Republic of Altai) for the low mountains and middle mountains of the Northern and Northeastern Altai provinces. The algorithm for analyzing the actual state of land covers and identifying the main vectors of their transformation was adapted to the study area. A series of multi-temporal Landsat images for three time slices was used. It is found that the plain catchments of the steppe and forest-steppe zones are characterized by a smaller amplitude of land cover change as compared to the mountain zones. For the inland drainage area of the Ob-Irtysh interfluvium and the left bank of the Upper Ob, a reduction of the arable land and a high natural dynamics of water bodies are most indicative. The right bank of the Ob is characterized by the lowest dynamics of all types of land cover and

a significant dynamics of artificial water bodies. In the mountain basins, a noticeable decrease in the forest areas largely in favor of natural grass communities was caused by the economic activities. It is also shown that the directions of changes and transitions of different types of land covers can differ greatly for different groups of landscapes.

Keywords: *land covers, remote sensing, Altai Krai, Republic of Altai, groups of landscapes, transition matrices.*

ВВЕДЕНИЕ

В зарубежной литературе по географии и ландшафтной экологии при анализе динамики ландшафтов широко используется понятие «наземные покровы» (НП) (англ. — land use/land cover change). В отечественной географии этот термин применяется сравнительно недавно. Известно и имеет множество синонимов, среди которых наиболее распространены следующие: «классы землепользования», «классы подстилающей поверхности», «ландшафтный покров», «земельные угодья». В некоторых работах понятия «наземные покровы» и «геосистема» тождественны. Термин НП подразумевает отображение биофизических свойств земной поверхности в категориях ее состояний (леса, кустарники, болота, пашни, строения, водная поверхность озер и т. п.). Применение этого понятия не требует обоснования строгих схем ландшафтной иерархии. Иерархический уровень отображения территории обычно определяется масштабом, отвечающим целям исследования [1].

Есть мнение, что в настоящее время динамика НП, наряду с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере и трансформацией круговорота азота, представляет собой одно из трех доказанных глобальных изменений на планете [2]. Динамика НП оказывает влияние на климат, биообразии и экосистемные услуги, что, в свою очередь, определяет характер землепользования [3].

В основе динамики НП могут лежать как медленные поступательные, так и быстрые, нередко катастрофические, изменения, такие как войны, вспышки болезней, экономические кризисы и т. д. [4–7]. Одним из важнейших событий последних десятилетий был крах социализма в Восточной Европе и бывшем Советском Союзе в начале 1990-х гг. и сопровождавший его переход от экономики, контролируемой государством, к рыночной [8]. В ряде стран и во многих регионах России это привело к масштабным изменениям в структуре НП: запустению пашни и пастбищ, незаконным рубкам лесов, антропогенным пожарам и др. [9–14]. Однако закономерности динамики НП в последние десятилетия до конца не поняты [15], так как они имеют региональную специфику.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время становятся основным источником информации о динамике НП [16–18]. Масштабы применения материалов ДЗЗ настолько широки, что давно вышли за пределы собственно научных исследований, активно развиваясь во многих отраслях экономики: сельское и лесное хозяйство, нефтегазовая отрасль и т. д. Анализ пространственно-временных изменений ландшафтов имеет основополагающее значение для понимания многочисленных социальных, экономических и экологических проблем [19] и может предоставить ценные сведения для принятия соответствующих управленческих решений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выбраны несколько репрезентативных водосборных бассейнов Алтайского региона: бассейны Касмалинской и Барнаульской ложбин древнего стока (включая современные бассейны оз. Горькое (бессточное), рек Касмалы и Барнаулки), рек Большой Речки, Маймы и Белой (рис. 1). Данные бассейны чрезвычайно разнородны по своей ландшафтной структуре, режимам природопользования и гидрологическим характеристикам. Каждый бассейн в указанных аспектах соответствует определенным физико-географическим условиям Алтая.

Касмалинский бассейн (бассейны оз. Горькое и р. Касмалы) и бассейн р. Барнаулки объединены в единую ключевую территорию Касмала–Барнаулка, поскольку наследуют одноименные смежные ложбины древнего стока (ЛДС), сочетая различные направления и характер стока, а также объединяя ландшафты бессточной области Обь-Иртышского междуречья и бассейна Верхней Оби. Бассейн р. Большой Речки типичен для правобережья Верхней Оби. Здесь водосборы малых и средних рек развиваются на поверхностях Бийско-Чумышской возвышенности и древних обских террас. Общая черта всех вышеуказанных бассейнов — это сочетание определенных ландшафтов: равнинных зональных (степных и лесостепных), экстразональных сосновых боров, сформировавшихся на песчаных отложениях днищ ложбин древнего стока и террас р. Оби, а также интразональных гидроморфных, полугидроморфных и галогидроморфных. Равнинная территория имеет длительную историю хозяйственного освоения, при этом сельскохозяйственная и лесохозяйственная деятельность развиваются здесь, непосредственно контактируя друг с другом в пространстве.

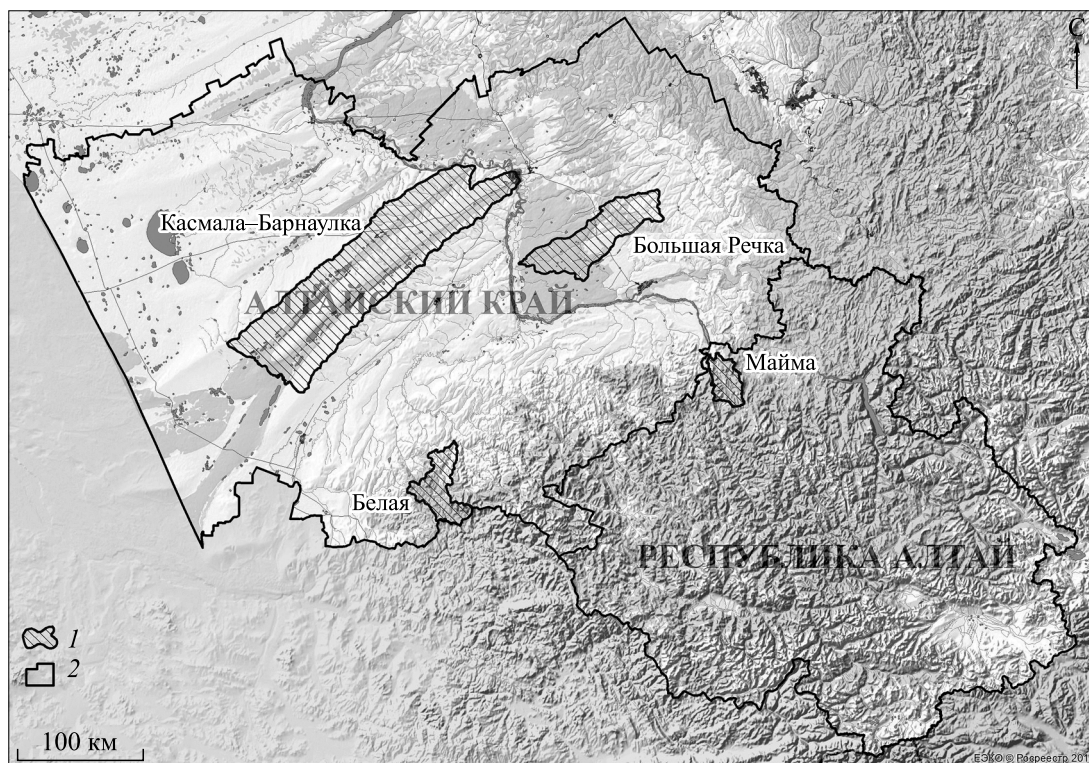


Рис. 1. Положение ключевых бассейнов в пределах Алтайского края и Республики Алтай.

1 — модельные бассейны; 2 — граница регионов.

Бассейны рек Маймы и Белой репрезентативны для низко- и среднегорных территорий северного макросклона Русского Алтая, которые формируют основную часть стока весеннего половодья Верхнеобского бассейна [20]. В ландшафтной структуре доминируют горнолесные (подтаежные и черново-таежные) ландшафты, а низовья относятся к лесостепным низкогорьям.

Алгоритм настоящего исследования основан на интеграции ГИС-технологий и методов обработки разновременных космических снимков и включает в себя семь этапов: отбор и получение снимков, предклассификационная обработка, классификация, постклассификационная обработка, верификация и модификация полученных материалов, сопоставление разновременных данных, анализ пространственно-временных изменений.

В качестве ДЗЗ выбраны данные со спутников серии Landsat (сканеры MSS, ETM+, OLI). Накопленные и находящиеся в открытом доступе [21] глобальные архивы данных открывают крайне широкие возможности ретроспективного анализа. Снимки Landsat имеют большое число спектральных каналов, высокое пространственное разрешение, широкий временной охват и свободный доступ к базе данных.

На первоначальном этапе работ производился отбор безоблачных и малооблачных сцен, одной либо нескольких, максимально близких по дате съемки. Всего в исследовании использовано 25 сцен (path/row) (табл. 1). Ключевая территория Касмала–Барнаулка покрывается тремя сценами съемки во всех временных периодах, бассейн р. Белой (см. табл. 1) — двумя сценами в 2014 г. Остальные периоды — по одной сцене на один временной срез.

При подборе ДЗЗ важно использовать разногодичные снимки, но за близкие даты одного сезона, что уменьшает вероятность принять сезонные изменения за многолетние. Для контрастных по ландшафтной структуре территорий, охватывающих горы и равнины, необходим подбор дублирующих разносезонных снимков одного временного среза. Весенние снимки удобны для создания маски сельхозугодий, но в это время горные территории еще не полностью освобождаются от снега, что вызывает проблемы при автоматизированной классификации. Кроме того, в случае гор при обработке снимков тени могут классифицироваться, к примеру, как водные объекты. Ввиду этого очень важен качественный подбор исходных данных.

Таблица 1

Сцены космических снимков Landsat для ключевых водосборных бассейнов Алтайского региона

Времен- ной срез	Съемочная система	Касмала–Барнаулка		Большая Речка		Майма		Белая	
		Дата	Path/Row	Дата	Path/Row	Дата	Path/Row	Дата	Path/Row
I	Landsat 2 MSS	14.08.1975	161/24	30.08.1975	159/23	09.09.1976	157/24	01.06.1975	159/24
		09.05.1976	160/24					30.08.1975	
		09.05.1976	160/23						
II	Landsat 7 ETM	25.05.2001	149/24	27.05.2001	147/23	13.05.2001	145/24	09.08.2002	148/24
		25.05.2001	149/23					24.05.2003	
		02.05.2001	148/23						
III	Landsat 8 OLI	08.05.2015	149/24	28.05.2016	147/23	14.05.2016	145/24	07.05.2014	147/24
		08.05.2015	149/23					07.05.2014	147/25
		01.05.2015	148/23					11.08.2014	147/24
								11.08.2014	147/25

Примечание. Path/Row – координаты сцены по разграфке WRS2, используемой для каталогизации данных Landsat.

Автоматизированная классификация проводилась в несколько этапов. На первом из них создана маска сельскохозяйственных угодий, поскольку данный тип НП затруднительно отделить от окружающих из-за перекрытия спектральных сигнатур. Маска сельхозугодий создана путем расчета индекса NDVI и подбора значений, соответствующих открытой почве (даты съемки специально подобраны, когда поля свободны от посевов). На втором этапе проводилась неконтролируемая классификация снимков ISODATA с применением полученной маски сельхозугодий. Контроль достоверности классификации (и при необходимости внесение изменений в результирующие данные) открытых водных пространств проводился с помощью расчета индекса MNDWI [22]. Этот метод обнаружения водоемов по информации мультиспектральных данных основан на том, что вода в значительной мере поглощает излучение в среднем инфракрасном диапазоне.

При анализе изменений НП в работе использованы космические снимки, полученные разными съемочными системами и имеющие различные характеристики, в том числе пространственное разрешение. Их сопоставление может привести к ошибочным выводам об изменении НП, особенно малых объектов, ввиду различной полноты дешифрирования, исключения из анализа объектов, отображаемых на снимке более высокого разрешения и не видимых на снимке более низкого. Для корректного анализа сравниваемые материалы приведены к одинаковой детальности (ячейка 60 м), принятой по самому худшему пространственному разрешению используемых снимков Landsat 2 MSS. Подобный прием уменьшает детальность пространственного анализа, но увеличивает диапазон исследования временных изменений.

Проведены исследования по трем временным срезам (см. табл. 1): I – 1975–1976 гг., II – 2001–2003 гг., III – 2014–2016 гг. Рассмотрены четыре типа НП: водная поверхность озер и прудов (W – от англ. water body), сельскохозяйственные угодья (пахотные земли) и населенные пункты (AS – agriculture/settlement), леса сомкнутые (F – forest), естественные травяные сообщества – луга, степи, водно-болотные угодья (GSW – grassland, steppe, wetland). Анализ изменений населенных пунктов несомненно имеет немаловажное значение при оценке антропогенной динамики ландшафтов, но в рамках данного исследования застройка как самостоятельный тип НП не выделялась. Населенные пункты представляют собой сложный комплекс объектов (открытая почва, водоемы, постройки, асфальтированные дороги), размеры которых в большинстве своем меньше разрешающей способности снимков Landsat. Из-за схожести спектральных сигнатур (например, с сигнатурами открытой почвы, лугов или водной поверхности) возникают проблемы классификации снимков, так как коэффициент отражения пикселя представляет собой комбинацию коэффициентов отражений всех типов поверхности, попадающих в этот пиксель. В данном случае это не играет значительной роли в площадной оценке типов НП ввиду малой доли крупных урбанизированных территорий.

Полученные карты НП далее анализировались с помощью программного комплекса QGIS Desktop 2.18, модуль MOLUSCE (Modules for Land Use Change Simulations). Последний позволяет частично автоматизировать анализ динамики пространственной структуры по серии карт либо космических снимков, на которых отображено текущее состояние территории, за различные периоды времени [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате классификации разновременных данных получен ряд карт НП, соответствующих датам съемки (рис. 2), и проведен пространственно-временной анализ НП ключевых речных бассейнов на уровне групп ландшафтов (табл. 2–5). По результатам анализа составляются матрицы переходов [24–26], которые описывают пространственную частоту переходов контуров разных выделов один в другой на снимках разных лет (рис. 3).

Ключевая территория Касмала–Барнаулка. Индексы групп ландшафтов [27] соответствуют подтипам ландшафтов (природным подзонам): засушливая степь (I), умеренно-засушливая степь (II), южная лесостепь (III). Выделены роды ландшафтов: зональные водораздельно-лессовые (A), интразональные галогидроморфные (B), экстразональные псаммоморфные (C). Название групп ландшафтов формируется матричным способом, например, I-A — группа засушливо-степных зональных водораздельно-лессовых ландшафтов и т. д.

Бассейн р. Большой Речки. Индексы групп ландшафтов аналогичны описанным выше для ключевой территории Касмала–Барнаулка: подтип ландшафтов (природная подзона) — средняя лесостепь (IV). Роды ландшафтов — зональные и интразональные (AB), экстразональные псаммоморфные (C).

Бассейн р. Маймы. Индексы групп ландшафтов [28]: провинции — Северная Алтайская (с), Северо-Восточная Алтайская (d); высотные пояса — лесостепной пояс (1), лесной пояс (2). 1-с — экспозиционная лесостепь низкогорной части бассейна, включая низовья долины р. Маймы; 2-с — подтаежный и горно-таежный подпояса низкогорий и среднегорий бассейна, включая основную часть долины р. Майма; 2-d — чернево-таежный и горно-таежный подпояса низкогорий и среднегорий бассейна, включая долины правых притоков р. Маймы.

Бассейн р. Белой. Индексы групп ландшафтов [28]: Северо-Западная Алтайская провинция (b); высотные пояса — лесостепной (1), лесной (2), субальпийский (3). 1-b — экспозиционная лесостепь низкогорной части бассейна, включая низовья долины р. Белой; 2-b — чернево-таежный и горно-таежный подпояса низкогорий и среднегорий бассейна, включая основную часть долины р. Белая и притоков; 3-b — подгольцово-субальпинотипные среднегорья (массивы) и псевдогольцовые низкогорья (отдельные наиболее высокие вершины).

На ключевой территории Касмала–Барнаулка все типы НП наиболее стабильны во времени. Однако зафиксировано постепенное снижение доли (8 %¹) пашни (AS), переходящей главным образом в залежи, вторичные степи и в меньшей степени в леса. Этот процесс наблюдается со времени тотальной распашки (освоение целинных и залежных земель), происходившей в 1954–1961 гг. В пределах зональных ландшафтов трех подзон (I-A–III-A) сокращение составило от 4 до 12 % площади соответствующих групп ландшафтов. Гораздо более значительное уменьшение доли пашни (от 9 до 17 %) характерно для интразональных ландшафтов (I-B–III-B). Здесь, в отличие от зональных групп, где этот процесс происходил более-менее равномерно, резкое снижение фиксируется на снимке 2001 г. Распашка в пределах интразональных групп ландшафтов ограничена легким механическим составом почв (супеси, легкие суглинки и пески) и палеогидроморфизмом, с которым связано обилие засоленных участков, которые неудобны для возделывания. Эти факторы способствовали активному переходу пашни в залежи и пастбища.

GSW представляют собой наиболее динамичный тип. Возможен их переход в пашни, зарастание лесом либо затопление при разливе водоемов. Направленное возрастание площади данного типа в целом пропорционально уменьшению площадей AS. Наибольшее увеличение доли GSW происходит в пределах зональных (на 16 %) и интразональных (на 22 %) ландшафтов южно-лесостепной подзоны. В других подзонах рост несколько меньше: до 6 % на увалах и еще ниже — в интразональных ландшафтах. Причинами повышения доли данного типа НП в южной лесостепи стоит считать не только переходы пашни в залежь, но и вырубку леса.

В масштабах всей площади Касмала–Барнаулка леса незначительно изменяли свои площади (до 4 %). Однако по отдельным группам ландшафтов этот процесс существенно различался. В пределах групп ландшафтов I-A, I-B и II-A, II-B максимальное уменьшение доли лесов наблюдалось к 2001 г. Изменения происходили в пределах 2–9 %, при этом к 2015 г. доля лесов в засушливо-степной подзоне увеличилась относительно 1975 г., а в умеренно засушливой степи — уменьшилась. Кроме того, в засушливо-степной подзоне наблюдается последовательное увеличение доли лесов (на 12 % за весь период) в пределах экстразональной (C) группы ландшафтов.

¹ Здесь и далее приводятся изменения площади НП в процентах от площади водосборного бассейна либо от рассматриваемой группы ландшафтов за весь период исследования (если иной период не оговорен).

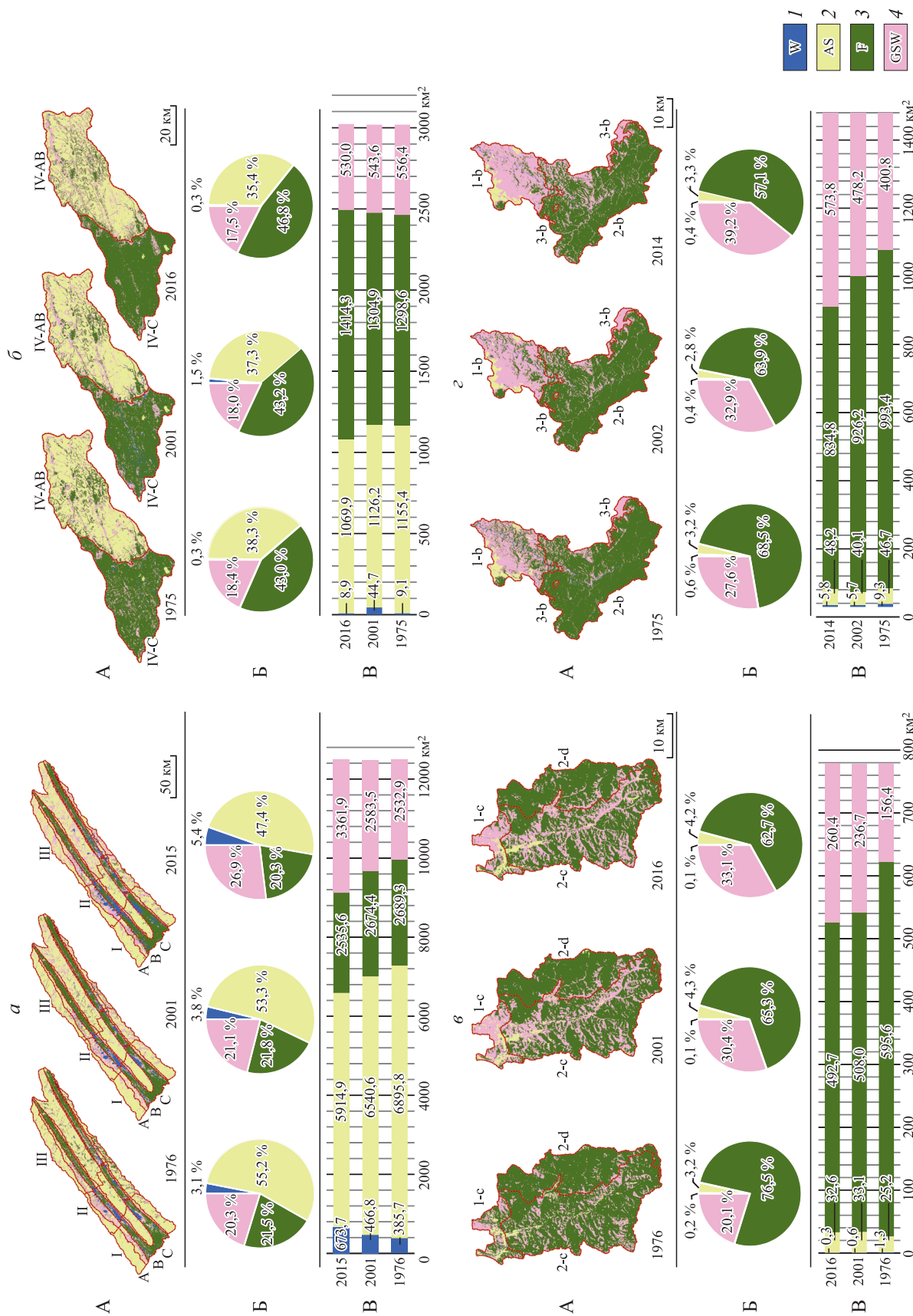


Рис. 2. Пространственное распределение типов наземных покровов (А), их соотношение (Б) и изменения их площадей (В) по ключевым водосборным бассейнам.

Ключевые водосборные бассейны: а — Касмала-Барнаулка, б — Большая Речка, в — Майма, г — Белая. IV-AB, 1-б и т. п. — индекс группы ландшафтов (пояснения см. в тексте).

Таблица 2

Матрицы изменений наземных покровов ключевой территории Касмала–Барнаулка по группам ландшафтов

L	1976 → 2001	W	AS	F	GSW	2001 → 2015	W	AS	F	GSW	S 1976, км ²	S 2001, км ²	S 2015, км ²
I-A	W	47,06	17,65	0	35,29	W	59,76	3,66	10,98	25,61	0,11	0,52	3,52
	AS	0,01	92,19	0,16	7,64	AS	0,10	89,36	1,49	9,05	1650,29	1612,56	1520,6
	F	0	35,14	10,02	54,84	F	0,16	28,49	61,64	9,71	30,8	8,04	52,04
	GSW	0,15	49,70	1,47	48,67	GSW	0,70	34,81	10,35	54,14	161,47	221,56	267,27
I-B	W	70,71	22,49	3,40	3,40	W	83,05	0,36	8,59	8,00	4,33	5,34	14,57
	AS	0,18	66,54	0,49	32,79	AS	1,98	54,12	4,29	39,62	242,14	265,38	177,84
	F	0,04	21,21	19,90	58,85	F	19,98	1,00	70,77	8,24	15,18	7,67	51,81
	GSW	0,76	41,30	1,36	56,58	GSW	1,47	15,02	15,27	68,24	242,3	225,56	260,58
I-C	W	97,44	1,34	0,29	0,93	W	97,71	0,04	1,67	0,58	128,68	148,23	185,21
	AS	17,75	11,91	26,28	44,05	AS	19,43	4,91	39,21	36,44	62,05	36,68	3,5
	F	0,36	1,10	91,87	6,67	F	0,85	0,02	95,99	3,15	786,34	837,99	933,52
	GSW	4,17	8,79	45,91	41,14	GSW	15,24	0,89	65,40	18,47	215,41	169,57	72,1
II-A	W	75,81	4,84	8,06	11,29	W	57,71	4,57	6,29	31,43	0,4	1,12	4,93
	AS	0,02	90,68	0,22	9,08	AS	0,20	89,84	1,37	8,59	1100,08	1082,28	1045,3
	F	0,03	23,75	18,73	57,49	F	0,58	6,35	61,36	31,71	88,08	26,2	62,35
	GSW	0,32	35,49	4,04	60,15	GSW	0,76	27,61	12,03	59,60	179,59	258,54	256,28
II-B	W	96,44	2,28	0,56	0,72	W	98,13	0,38	0,22	1,27	24,96	56,1	90,24
	AS	5,46	61,80	1,70	31,04	AS	5,53	55,39	2,42	36,66	236,37	226,59	182,3
	F	0,58	14,46	6,91	78,05	F	26,00	4,28	30,16	39,56	41,12	21,13	35,36
	GSW	5,59	21,89	4,18	68,34	GSW	5,03	16,41	6,91	71,66	338,02	336,67	334,37
II-C	W	95,82	1,60	0,89	1,69	W	98,01	0,06	0,49	1,44	148,81	158,24	187,05
	AS	11,49	19,12	45,90	23,48	AS	18,60	13,73	12,33	55,35	43,82	34,64	10,12
	F	0,77	1,88	87,47	9,88	F	4,09	0,14	71,98	23,79	274,94	312,6	258,36
	GSW	6,19	13,61	36,85	43,35	GSW	12,57	4,81	27,81	54,80	137,5	99,58	150,82
III-A	W	57,34	26,95	4,42	11,30	W	72,87	8,30	0,92	17,90	8,55	15,21	33,13
	AS	0,13	84,81	1,38	13,69	AS	0,44	83,67	0,17	15,73	2877,97	2701,99	2467,62
	F	0,83	28,48	17,00	53,70	F	2,70	14,23	7,42	75,65	224,2	128,24	20,9
	GSW	0,99	40,03	10,29	48,69	GSW	0,89	24,62	0,88	73,60	487,35	752,65	1082
III-B	W	74,79	17,06	2,92	5,23	W	86,17	1,24	2,66	9,93	16,88	22,06	37,56
	AS	0,39	73,34	2,31	23,96	AS	1,55	66,11	0,63	31,71	528,88	515,01	407,81
	F	1,27	20,72	22,10	55,91	F	6,51	5,56	24,55	63,39	149,44	85,86	34,57
	GSW	1,76	30,01	12,91	55,33	GSW	1,26	15,98	2,49	80,27	310,89	383,17	529,3
III-C	W	87,35	3,26	6,06	3,33	W	95,57	0,12	1,89	2,42	52,48	58,83	100,77
	AS	2,71	30,09	44,58	22,62	AS	9,70	45,37	8,70	36,22	104,01	53,63	38,25
	F	0,21	0,61	94,78	4,39	F	2,10	0,36	82,52	15,02	1069,19	1234,39	1048,84
	GSW	3,00	5,36	65,39	26,25	GSW	9,34	6,62	15,87	68,18	262,23	141,06	303,27

Примечание. Здесь и в табл. 3–5 изменения указаны в процентах от общей площади типа наземных покровов, L – индекс группы ландшафтов, S – общая площадь типа наземных покровов в указанный временной срез.

Таблица 3

Матрицы изменений наземных покровов бассейна р. Большой Речки по группам ландшафтов

L	1975 → 2001	W	AS	F	GSW	2001 → 2016	W	AS	F	GSW	S 1975, км ²	S 2001, км ²	S 2016, км ²
IV-AB	W	57,41	14,81	15,43	12,35	W	44,22	13,18	20,49	22,11	0,58	7,24	6,02
	AS	0,21	82,55	2,15	15,09	AS	0,08	81,41	3,31	15,20	1142,13	1117,55	1060,86
	F	0,47	14,10	59,90	25,53	F	0,45	12,87	60,11	26,58	274,95	248,8	256,34
	GSW	0,96	40,32	17,66	41,06	GSW	0,23	31,69	18,03	50,05	336,9	380,98	427,62
IV-C	W	30,98	0	48,35	20,67	W	6,09	0,18	86,90	6,83	8,52	37,5	2,94
	AS	1,83	63,54	21,79	12,84	AS	0,03	78,67	14,39	6,91	14,72	11,81	9,82
	F	2,28	0,14	86,73	10,85	F	0,04	0,04	95,83	4,10	1024,04	1055,71	1151,9
	GSW	5,09	0,47	72,76	21,67	GSW	0,16	0,02	66,18	33,63	220,25	162,51	101,05

Таблица 4

Матрицы изменений наземных покровов бассейна р. Маймы по группам ландшафтов

L	1976 → 2001	W	AS	F	GSW	2001 → 2015	W	AS	F	GSW	S 1976, км ²	S 2001, км ²	S 2016, км ²
1-c	W	29,82	22,02	9,17	38,99	W	26,00	46,00	24,00	4,00	0,79	0,34	0,18
	AS	0,43	53,08	1,77	44,72	AS	0,12	56,41	5,78	37,69	12,5	15,27	13,23
	F	0,10	14,51	26,44	58,95	F	0,10	0,97	86,36	12,56	29,51	10,38	13,81
	GSW	0,09	14,92	8,15	76,84	GSW	0,14	9,23	8,55	82,09	28,05	44,84	44,33
2-c	W	14,17	28,35	10,24	47,24	W	5,00	36,67	20,00	38,33	0,46	0,22	0,1
	AS	0,38	47,36	7,97	44,28	AS	0	42,73	10,87	46,41	11,33	15,94	17,4
	F	0,02	1,83	77,18	20,97	F	0,01	0,13	88,71	11,15	355,11	292,81	277,33
	GSW	0,04	3,75	16,83	79,38	GSW	0,04	6,16	9,24	84,56	105,63	163,56	179,02
2-d	W	0	0	100,00	0	W	100,00	0	0	0	0	0,03	0,03
	AS	0	33,98	20,46	45,56	AS	0	21,18	51,09	27,73	0,93	1,14	1,43
	F	0	0,33	92,85	6,81	F	0	0,03	94,72	5,26	206,93	201,47	195,04
	GSW	0,09	0,63	43,28	56,00	GSW	0	4,29	11,76	83,96	21,14	26,36	33,22

Таблица 5

Матрицы изменений наземных покровов бассейна р. Белой по группам ландшафтов

L	1975 → 2002	W	AS	F	GSW	2002 → 2014	W	AS	F	GSW	S 1975, км ²	S 2002, км ²	S 2014, км ²
1-b	W	64,70	0,07	6,04	29,20	W	91,81	0	1,46	6,73	5,43	3,69	3,79
	AS	0	68,88	0,57	30,55	AS	0,04	89,44	0,02	10,50	46,4	39,68	47,02
	F	0,05	0,99	57,18	41,78	F	0,13	0,07	57,35	42,44	100,82	73,32	47,46
	GSW	0,05	2,61	5,85	91,49	GSW	0,10	3,81	1,80	94,29	257,57	293,53	312,84
2-b	W	45,66	—	27,74	26,60	W	86,23	—	10,14	3,62	3,82	1,99	1,99
	F	0,02	—	93,43	6,55	F	0,02	—	90,31	9,68	871,91	838,66	767,68
	GSW	0,06	—	21,33	78,60	GSW	0,10	—	6,95	92,95	107,52	142,6	213,84
3-b	F	—	—	62,59	37,41	F	—	—	79,77	20,23	17,92	11,76	12,82
	GSW	—	—	1,68	98,32	GSW	—	—	8,80	91,20	32,59	38,74	37,8

Примечание. Прочерк — данные типы наземных покровов отсутствуют.

Очень контрастно выглядит ситуация с лесами в пределах всех групп ландшафтов южно-лесостепной подзоны. По родам ландшафтов А и В происходит последовательное и существенное снижение доли лесов, составившее 6 и 11 % соответственно. В пределах рода ландшафтов А площадь колочных и балочных лесов сократилась более чем в 10 раз, переходы происходили в основном в естественные травяные сообщества. Снижение с 2001 г. (год, в который зафиксирована наибольшая площадь лесов) доли лесов происходило и по роду С, составив 13 %. Учитывая, что в данный тип попадают все леса (в том числе различные антропогенные модификации), снижение площади чистых сосняков, скорее всего, было еще более значительным.

В бассейне р. Большой Речки доля всех типов НП в общей структуре меняется незначительно, не превышая 1–3 %. Площадь AS практически остается одинаковой весь временной период (в пределах 3 %). Однако наблюдаются прямые и обратные переходы между данным типом НП и GSW, вызванные, вероятно, взаимным пространственным транспонированием (например, заброшенная пашня → залежь, залежь или вторичная степь → пашня). В отличие от Касмала–Барнаулка, здесь доля GSW незначительно, но снижается. Это происходит благодаря уменьшению площади данного типа (на 9 %) в IV-С, где он активно переходит в леса (см. табл. 2). В пределах IV-AB, напротив, доля естественных травяных сообществ возрастает (на 5 % за весь период).

Доля лесов существенно не повышается в масштабах всего бассейна (до 3 %). Это происходит несмотря на увеличение их площади в пределах IV-С (на 10 %), где они постепенно занимали площади GSW. Данный процесс обусловлен двумя факторами: во-первых, зарастанием обширных сплошных вырубков, во-вторых, образованием согр на переувлажненных территориях. Однако здесь же отмечается появление GSW на месте леса, скорее всего вызванное новыми вырубками либо пожарами,

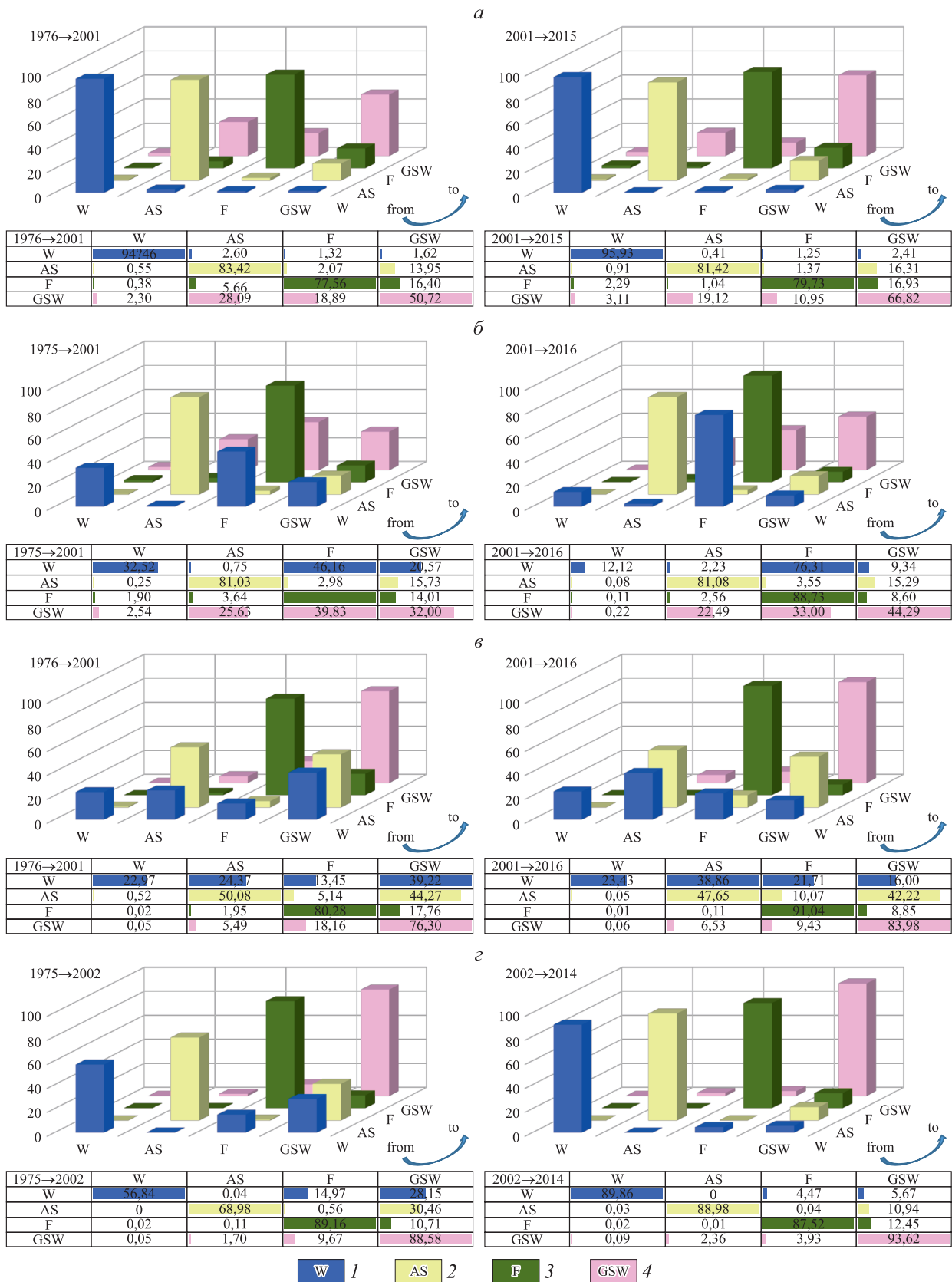


Рис. 3. Матрицы изменений наземных покровов по ключевым водосборным бассейнам, % от общей площади бассейна.

Ключевые водосборные бассейны: а – Касмала–Барнаулка, б – Большая Речка, в – Майма, г – Белая. 1 – водная поверхность озер и прудов; 2 – сельскохозяйственные угодья и населенные пункты; 3 – леса; 4 – естественные травяные сообщества.

Таблица 6

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона для структуры НП водосборных бассейнов (1975–2015 гг.)

	Касмала–Барнаулка	Белая	Большая Речка	Майма
Касмала–Барнаулка	1,00			
Белая	–0,12	1,00		
Большая Речка	0,66	0,52	1,00	
Майма	–0,11	0,96	0,62	1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены показатели значимой корреляции.

преимущественно вблизи крупных населенных пунктов. В пределах IV-AB отмечается незначительное снижение доли F (до 1 %), вызванное рубками, пожарами и т. п. (равная трансформация в AS и GSW).

Примечательна динамика площадей водных объектов в пределах рассматриваемых равнинных бассейнов. В отличие от бассейна р. Большой Речки, на территории Касмала–Барнаулка наряду с прудами существуют также крупные естественные озера. По исследованиям в бассейне р. Касмалы площадь прудов постепенно снижается со времени их максимального развития в середине 1980-х гг. [29]. По трем рассматриваемым временным срезам доля площадей W увеличивается от 3,08 % в 1976 г. до 5,40 % в 2015 г. в бассейнах территории Касмала–Барнаулка. Тем не менее эти изменения, вероятно, не являются направленными, а связаны с гидротермическими условиями конкретного года.

В бассейне Большой Речки к 2001 г. наблюдается увеличение площади W, главным образом, за счет строительства гидросооружений (в 12 раз в группе ландшафтов IV-AB). В период 2001–2016 гг. в группе IV-AB этот тип НП относительно стабилен, незначительно уменьшая свою площадь за счет исчезновения ряда прудов. В тот же период в группе ландшафтов IV-C отмечается существенное сокращение площади водных объектов в связи с зарастанием озер.

Структура НП более критично трансформировалась во времени. Если W и AS слабо изменяют свои доли в структуре НП, то F и GSW наиболее динамичны. Фактически переходы происходят в основном между этими двумя типами НП. Основная тенденция в обоих бассейнах — существенное снижение к настоящему моменту доли лесов в структуре НП (на 11–14 %). В бассейне р. Белой максимальное сокращение (фактически больше половины площади) произошло в наиболее освоенной лесостепной части бассейна (1-с), где леса произрастали на экспозиционно благоприятных участках. В наиболее обширной части бассейна, относимой к лесным низкогорьям (2-b), площади лесов также сократились (на 11 %). Это произошло даже несмотря на организацию в верховьях бассейна Тигирекского заповедника. В бассейне р. Маймы наибольшее сокращение лесов произошло в пределах подтаежной и горно-таежной части (2-с) (на 17 %). Эти территории также достаточно освоены и, учитывая преобладание склоновых поверхностей, в результате сокращения лесных площадей создаются существенные риски опасных гидрологических процессов [30].

Для сравнения ключевых бассейнов была построена матрица коэффициентов корреляции Пирсона (табл. 6), отражающая связь между бассейнами по доли площади каждого типа НП на три временных среза (12 пар данных). Наиболее тесные связи при уровне значимости $p < 0,05$ наблюдаются между бассейнами рек Маймы и Белой. Как уже было отмечено, общие тенденции изменений НП в этих бассейнах очень схожи. Также значимы связи между бассейнами Касмалы–Барнаулки и р. Большой Речки. Корреляция между ними менее тесная, видимо, из-за существенных различий в ходе развития водных объектов. Кроме того, существует достоверная связь между бассейнами рек Маймы и Большой Речки. Преобладание лесов в структуре НП придает бассейну р. Большой Речки схожесть с горными бассейнами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для территории Алтайского региона апробирован алгоритм количественного анализа динамики наземных покровов (land use/land cover change) за 1975–2016 гг. на основе разновременных снимков серии Landsat. В качестве модельных объектов выбраны четыре репрезентативных водосборных бассейна (Касмала–Барнаулка, Большая Речка, Майма, Белая), наглядно характеризующие ландшафтное разнообразие и различные режимы природопользования в регионе. В отличие от аналогичных зарубежных работ, пространственно-временная динамика наземных покровов в пределах бассейнов оценена по основным группам ландшафтов.

Полученные результаты показали, что динамика ландшафтов за рассматриваемый период имеет специфику в различных природных зонах и подзонах, а также в пределах равнинных и горных территорий. Выявлены следующие особенности и закономерности:

– равнинные бассейны степной и лесостепной зон характеризуются меньшей амплитудой изменений наземных покровов (до 8 %) по сравнению с горными (до 14 %);

– для степной зоны и южно-лесостепной подзоны (левобережье Оби) наиболее свойственны снижение доли пахотных (доминирующих по площади) угодий и высокая естественная динамика водных объектов;

– в лесостепной зоне (правобережье Оби) наблюдается наименьшая динамика всех типов наземных покровов (до 4 %) и значимая динамика искусственных водных объектов (группа ландшафтов IV-AB в бассейне р. Большой Речки: 0,58 км² в 1976 г., 7,24 км² в 2001 г. и 6,02 км² в 2016 г.);

– горные бассейны с доминированием лесопокрываемых площадей (реки Майма и Белая) характеризуются значительным снижением их доли (до 14 %), преимущественно в пользу естественных травяных сообществ, в результате хозяйственной деятельности.

Применяемый в работе алгоритм может быть использован для проведения сравнительного анализа преобразований на региональном уровне, выявления общих закономерностей развития природных систем и моделирования их состояния, создания системы регионального и глобального мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18–05–00007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г.** Отображение основных функциональных свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации для обеспечения начальных стадий проектирования освоения углеводородных и лесных ресурсов // *Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика: Материалы XI Междунар. ландшафт. конф.* — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. — С. 672–673.
2. **Vitousek P.M.** Beyond global warming: ecology and global change // *Ecology*. — 1994. — Vol. 75, N 7. — P. 1861–1876.
3. **Ojima D.S., Galvin K.A., Turner B.L.** The global impact of land-use change // *BioScience*. — 1994. — Vol. 44, N 5. — P. 300–304.
4. **Aide T.M., Grau H.R.** Globalization, migration, and Latin American ecosystems // *Science*. — 2004. — Vol. 305. — P. 1915–1916.
5. **Rudel T.K., Coomes O.T., Moran E., Achard F., Angelsen A., Xu J. C., Lambin E.** Forest transitions: towards a global understanding of land use change // *Global Environmental Change*. — 2005. — Vol. 15, N 1. — P. 23–31.
6. **Machlis G. E., Hanson T.** Warfare ecology // *BioScience*. — 2008. — Vol. 58, N 8. — P. 729–736.
7. **Baumann M., Radeloff V.C., Avedian V., Kuemmerle T.** Land-use change in the Caucasus during and after the Nagorno-Karabakh conflict // *Regional Environmental Change*. — 2015. — Vol. 15, N 8. — P. 1703–1716.
8. **Prishchepov A.V., Müller D., Dubinin M., Baumann M., Radeloff V.C.** Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia // *Land Use Policy*. — 2013. — Vol. 30. — P. 873–884.
9. **Kuemmerle T., Hostert P., Radeloff V., der Linden S. van, Perzanowski K., Kruhlov I.** Cross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians // *Ecosystems*. — 2008. — Vol. 11, N 4. — P. 614–628.
10. **Wright C.K., Beurs K.M. de, Henebry G.M.** Combined analysis of land cover change and NDVI trends in the Northern Eurasian grain belt // *Frontiers of Earth Science*. — 2012. — Vol. 6, N 2. — P. 177–187.
11. **Ioffe G., Nefedova T., Beurs K. de.** Land abandonment in Russia // *Eurasian Geography and Economics*. — 2012. — Vol. 53, N 4. — P. 527–549.
12. **Alcantara C., Kuemmerle T., Baurmann M., Radeloff V.** Mapping the extent of abandoned farmland in central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data // *Environmental Research Letters*. — 2013. — Vol. 8, N 3. — P. 035035.
13. **Griffiths P., Müller D., Kuemmerle T., Hostert P.** Agricultural land change in the Carpathian ecoregion after the breakdown of socialism and expansion of the European Union // *Environmental Research Letters*. — 2013. — Vol. 8, N 4. — P. 045024.
14. **Newell J.P., Simeone J.** Russia's forests in a global economy: how consumption drives environmental change // *Eurasian Geography and Economics*. — 2014. — Vol. 55, N 1. — P. 37–70.
15. **Houghton R.A., Butman D., Bunn A.G., Krankina O.N., Schlesinger P., Stone T.A.** Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories // *Environmental Research Letters*. — 2007. — Vol. 2, N 4. — P. 045032.
16. **Peterson U., Aunap R.** Changes in agricultural land use in Estonia in the 1990 detected with multitemporal Landsat MSS imagery // *Landscape and Urban Planning*. — 1998. — Vol. 41, N 3–4. — P. 193–201.

17. **Bergen K.M., Zhao T., Kharuk V., Blam Y., Brown D.G., Peterson L.K., Miller N.** Changing regimes: Forested land cover dynamics in Central Siberia 1974 to 2001 // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. — 2008. — Vol. 74, N 6. — P. 787–798.
18. **Sieber A., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Wendland K.J., Baumann M., Radeloff V.C., Baskin L.M., Hostert P.** Landsat-based mapping of post-Soviet land-use change to assess the effectiveness of the Oksky and Mordovsky protected areas in European Russia // *Remote Sensing of Environment*. — 2013. — Vol. 133. — P. 38–51.
19. **Rafaella P., Leone A., Voccia L.** Land cover and land use change in the Italian central Apennines: a comparison of assessment methods // *Applied Geography*. — 2009. — Vol. 29, N 1. — P. 35–48.
20. **Галахов В.П., Сюраев А.А.** Расчет объема стока первой волны половодья Оби у Барнаула. — Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2016. — 122 с.
21. **Каталог GloVis /** Официальный сайт геологической службы США [Электронный ресурс]. — <http://glovis.usgs.gov/> (дата обращения 21.12.2016).
22. **Xu H.** Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. — 2006. — Vol. 27, N 14. — P. 3025–3033.
23. **Страница** модуля MOLUSCE / Официальный репозиторий расширений QGIS [Электронный ресурс]. — <http://plugins.qgis.org/plugins/molusce/> (дата обращения 12.12.2016).
24. **Fan F., Weng Q., Wang Y.** Land Use and Land Cover Change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, Based on Landsat TM /ETM+ Imagery // *Sensors*. — 2007. — Vol. 7, N 7. — P. 1323–1342.
25. **Ramachandra T.V., Uttam K., Joshi N.V.** Landscape Dynamics in Western Himalaya — Mandhala Watershed, Himachal Pradesh, India [Электронный ресурс]. — <http://www.geoinfo.ait.asia/ajg/index.php/journal/article/view/31/14/> (дата обращения 12.12.2016).
26. **Kindu M., Schneider T., Teketay D., Knoke T.** Land use/land cover change analysis using object-based classification approach in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands // *Remote Sensing*. — 2013. — Vol. 5, N 5. — P. 2411–2435.
27. **Черных Д.В., Золотов Д.В.** Пространственная организация ландшафтов бассейна реки Барнаулки. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 205 с.
28. **Черных Д.В., Самойлова Г.С.** Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край). Карта. М-б 1:500 000. — Новосибирск: ФГУП «Новосибирская картографическая фабрика». — 2011. — Л.
29. **Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Вагнер А.А.** Антропогенные модификации и трансформации ландшафтов в бассейне р. Касмала: классификация и динамика на основе данных дистанционного зондирования // *Вестн. алтайской науки*. — 2014. — № 1. — С. 233–240.
30. **Лубенец Л.Ф., Черных Д.В.** Роль антропогенных модификаций в ландшафтно-гидрологической организации бассейна р. Майма // *Вестн. Волгогр. ун-та. Сер. 11. Естественные науки*. — 2015. — № 1. — С. 61–67.

Поступила в редакцию 13 декабря 2016 г.

REGIONAL PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL STUDIES
AND NATURAL RESOURCES UTILIZATION

Spatiotemporal Dynamics of Landscapes of Plain and Mountain Catchments in the Altai Region During the Last 40 Years

D. V. Chernykh ^{a, b, *}, R. Yu. Biryukov ^{a, **}, D. V. Zolotov ^{a, ***}, and D. K. Pershin ^{a, b, ****}

^a *Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, 656038 Russia*

^b *Altai State University, Barnaul, 656049 Russia*

* *e-mail: chernykhd@mail.ru*

** *e-mail: rubiryukov@mail.ru*

*** *e-mail: zolotov@iwep.ru*

**** *e-mail: dmitrypersh@gmail.com*

Received December 13, 2016

Abstract—The spatiotemporal dynamics of land covers of representative catchments of the Altai region (Altai Krai and Republic of Altai) was analyzed using remote sensing data and GIS techniques. The following key areas were used: the adjacent basins of Lake Gor’koe and the Kasmala and Barnaulka rivers on the Ob Plateau (Altai krai) were used for the inland drainage area of the Ob-Irtysh interfluvium and the left bank of the Upper Ob; the Bol’shaya Rechka basin on the Biisk-Chumysh Upland and ancient Ob terraces (Altai krai), for the right bank of the Upper Ob; the Belaya river basin (Altai krai) for the low mountains and middle mountains of the Northwestern province of Russian Altai, and the Maima river basin (Republic of Altai) for the low mountains and middle mountains of the Northern and Northeastern Altai provinces. The algorithm for analyzing the actual state of land covers and identifying the main vectors of their transformation was adapted to the study area. A series of multitemporal Landsat images for three time slices was used. It is found that the plain catchments of the steppe and forest-steppe zones are characterized by a smaller amplitude of land cover change as compared to the mountain zones. For the inland drainage area of the Ob-Irtysh interfluvium and the left bank of the Upper Ob, a reduction of the arable land and a high natural dynamics of water bodies are most indicative. The right bank of the Ob is characterized by the lowest dynamics of all types of land cover and a significant dynamics of artificial water bodies. In the mountain basins, a noticeable decrease in the forest areas largely in favor of natural grass communities was caused by the economic activities. It is also shown that the directions of changes and transitions of different types of land covers can differ greatly for different groups of landscapes.

DOI: 10.1134/S187537281803006X

Keywords: land covers, remote sensing, Altai krai, Republic of Altai, groups of landscapes, transition matrices.

INTRODUCTION

The term “land use/land cover change” has gained widespread acceptance in the foreign English-language literature (henceforth to be referred to as LC). National geography introduced this terminology relatively recently. To date it has a great number of synonyms, and the commonest of them are: “classes of land use”, “classes of underlying surface”, “landscape cover”, and “agricultural areas”. In some publications, the notion of “land covers” is equated with the “geosystem”. The term “LC” implies expressing the biophysical properties of the terrestrial surface in the categories of its states (forests, bogs, croplands, structures and buildings, water surface of lakes, etc.). To use this notion does not require any rigorous schemes of the landscape hierarchy. The hierarchical level of mapping a territory is usually determined by the scale corresponding to the goals of an investigation [1].

It is speculated that the current LC dynamics, along with an increase in carbon dioxide concentration in the atmosphere and the transformation of the nitrogen cycle, is one of the three proved global changes on our planet Earth [2]. The LC dynamics has influence on the climate, biodiversity and ecosystem services, which, in turn, has implications for decision-making in the realm of land use [3].

Central to the LC dynamics can be slow progressive, often disastrous, changes, such as wars, outbreaks of diseases, economic crises, etc. [4–7]. One of the most dramatic developments of the last several decades was the breakdown of socialism in Eastern Europe and in the former Soviet Union in the early 1990s and the accompanying transition of the economy controlled by the state to a market economy [8]. In some countries and in many regions of Russia this brought about large-scale changes in the LC structure: cropland and pasture abandonment, illegal

falling, anthropogenic fires, etc. [9–14]. However, the regularities in the LC dynamics over the last several decades have not yet been fully understood [15], because they have a regional specific character.

Earth remote sensing data (ERSD) are becoming the main source of information on the LC dynamics [16–18]. ERS data are being used to such an extent that they have long gone far beyond the scope of scientific research and “encroached” upon many economic sectors, such as agriculture, the oil and gas sector, etc. Analysis of spatiotemporal changes in landscapes is of paramount importance for understanding a great number of social, economic and ecological problems [19] and can provide valuable information for appropriate managerial decision-making.

THE OBJECT AND METHODS

As the objects for study, we used several representative drainage basins of the Altai region: the basins of the Kasmala and Barnaulka dingles of old runoff (DORs) (that include the contemporary basins of Lake Gor’koe (drainless) and of the Kasmala and Barnaulka rivers)) as well as of the Bol’shaya Rechka, Maima and Belaya rivers (Fig. 1). These basins are extremely heterogeneous in their landscape structure and hydrological characteristics. Seen from this perspective, each basin is characteristic for particular physical-geographical conditions of Altai.

The Kasmala basin (the basins of Lake Gor’koe and the Kasmala river) and the Barnaulka river basin are combined into a single key territory, Kasmala–Barnaulka, because they inherit the contiguous DORs of the same name, combining the different directions and the pattern of the runoff as well as the landscapes of the drainless region of the Ob-Irtysh interfluvium and the Upper Ob basin. The basin of the Bol’shaya Rechka is typical for the right bank of the Upper Ob. In this area, the catchments of the small and medium-sized rivers occur on the surface of the Biisk-Chumysh upland and the old Ob terraces. A common feature for all of the aforementioned basins is a combination of particular landscapes: plain zonal (steppe and forest-steppe), extrazonal pine forests that emerged on sandy deposits in the bottoms of DORs and the terraces of the Ob river as well as intrazonal hydromorphic and semihydromorphic landscapes. The lowland territory has a long history of development, and agriculture and forestry are pursued in immediate spatial contact.

The Maima and Belaya river basins are representative the low- and middle-mountain territories of the northern macroslope of Russian Altai which make up most of the spring flood runoff in the Upper Ob basin [20]. The landscape structure is dominated by mountain-forest (subtaiga and chern-taiga) landscapes, while the lowlands refer to the forest-steppe low mountains.

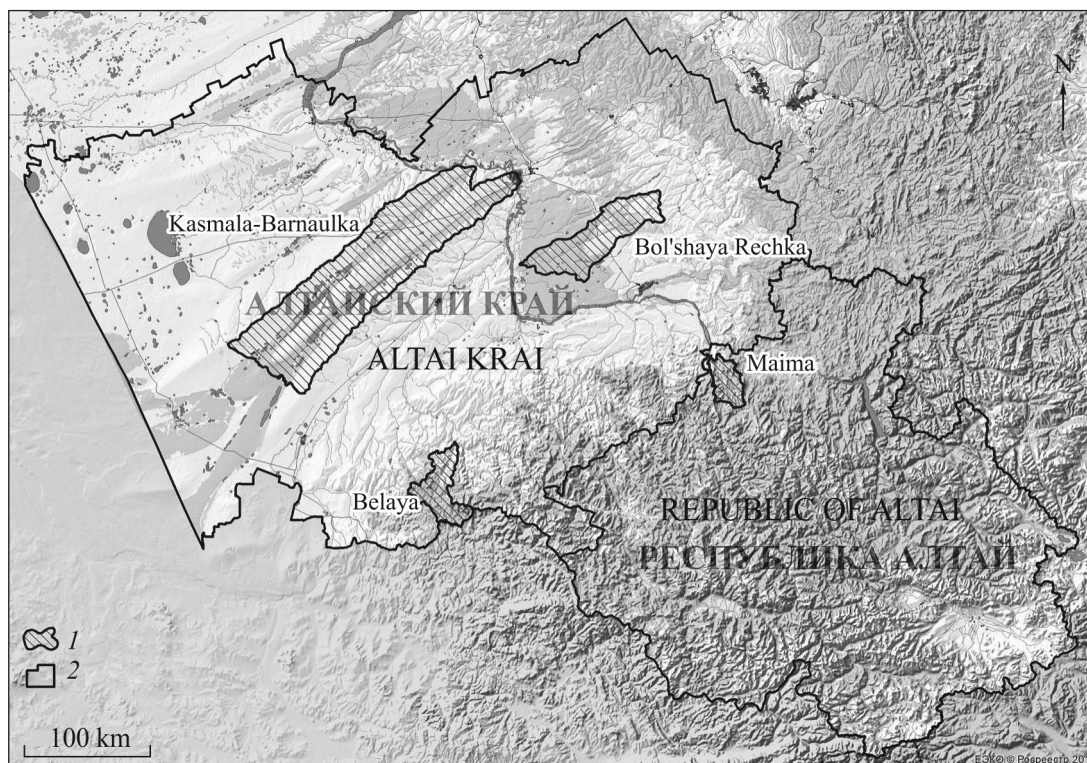


Fig. 1. Location of the key basins within Altai krai and the Republic of Altai.
1 – model basins; 2 – boundaries of regions.

The algorithm of this research is based in integrating GIS technologies and methods of processing multitemporal satellite images and includes seven stages: selection and retrieval of images, pre-classification processing, classification, post-classification processing, verification and modification of material obtained, comparison of multitemporal data, and analysis of spatiotemporal changes.

As ERSD, we used Landsat imagery (the MSS, ETM+ and OLI scanners). Publicly available global data archives [21] afford exceptionally ample opportunity for retrospective analysis. Landsat images have a large number of spectral channels, high spatial resolution, broad temporal coverage and free access to the database.

The initial stage involved selecting cloudless and low-cloud scenes of one or several images taken at dates as closely separated as possible. The study used a total of 25 scenes (path/row) (Table 1). The Kasmala–Barnaulka key territory is covered by three imaging scenes in all time periods, and the Belaya basin (see Table 1) by two scenes in 2014. The other periods are covered by one scene each, per time slice.

In selecting ERSD, it is important to use images from different years but for closely spaced dates of the same season in order to reduce the likelihood that seasonal changes would be perceived as long-term changes. For contrasting (in landscape structure) territories encompassing mountains and valleys it is necessary to select replicating images from different seasons and for the same time slice. Spring images are convenient for creating the mask of agricultural lands but at that time the mountain territories have not yet fully freed themselves from snow, which causes problems with an automated classification. Furthermore, there arise difficulties in processing images because of the presence of shadows which can be classified a water bodies, for example. Because of this, it is very important to select input data with high quality.

An automated classification was carried out in several stages. The first stage involved creating the mask of agricultural lands, because the classification procedure posed problems with separation of this type of LC from the surroundings LCs as a result of the overlap of spectral signatures. The mask of agricultural lands was created by calculating the NDVI index and selecting the values corresponding to the open soil (the dates of images were specifically selected when the fields were not under crops). The second stage involved an unsupervised ISODATA image classification by using the resulting mask of agricultural lands. Validation of the classification (and, where necessary, the introduction of changes in the resultant data) of the open spaces was carried out by calculating the MNDWI index [22]. This method of identifying water bodies from information of multispectral data relies on the fact that radiation is absorbed by water in the infrared band. Hence, it is possible to effectively reveal open water spaces.

In this study, to analyze LC changes used satellite images taken by different imaging systems and featuring different characteristics, including spatial resolution. Comparison of such images can lead to erroneous conclusions about LC change, especially small objects, because of the different completeness of interpretation and the exclusion (from the analysis) of objects displayed on a higher-resolution image and not seen on a lower-resolution image. For a correct analysis, material to be compared was brought to the same detail (60-m cell) adopted according to the worst spatial resolution of the Landsat 2 MSS images used. Such a procedure decreases detail of spatial analysis but increases the range of investigation of temporal changes.

The investigations were made for three time slices (see Table 1): I – 1975–1976, II – 2001–2003, and III – 2014–2016. Four types of LC were considered: the water surface of lakes and ponds (W), agricultural lands (croplands) and settlements (AS – agriculture/settlement), closed forests (F), and natural grass

Table 1. Scenes of Landsat images for the key drainage basins of the Altai region

Time slice	Imaging system	Kasmala-Barnaulka		Bol'shaya Rechka		Maima		Belaya		
		date	Path/Row*	date	Path/Row	date	Path/Row	date	Path/Row	
I	Landsat 2 MSS	8.14.1975	161/24	8.30.1975	159/23	9.9.1976	157/24	6.1.1975	159/24	
		5.9.1976	160/24					8.30.1975		
		5.9.1976	160/23							
II	Landsat 7 ETM	5.25.2001	149/24	5.27.2001	147/23	5.13.2001	145/24	8.9.2002	148/24	
		5.25.2001	149/23					8.17.2001		5.24.2003
		5.2.2001	148/23							
III	Landsat 8 OLI	5.8.2015	149/24	5.28.2016	147/23	5.14.2016	145/24	5.7.2014	147/24	
		5.8.2015	149/23					9.3.2016	5.7.2014	147/25
		5.1.2015	148/23					8.11.2014	147/24	
								8.11.2014	147/25	

*Path/Row – coordinates of the scene according to the WRS2 intermap relationship used to catalog Landsat data.

communities (GSW – grassland, steppe, wetland). Of course, analysis of changes in settlements is essential to assessing the anthropogenic dynamics of landscapes but it was not identified as an independent type of LC within the framework of this study. Settlements constitute a complex cluster of objects (the open soil, water bodies, buildings, and asphaltic roads), the size of which is in most cases below the resolution of the Landsat images. Because of the similarity of the spectral signatures (with, for example, the signatures of the open soil, grassland or the water surface), there arise problems with a classification of the images, as the value of the reflection coefficient of a pixel is a combination of the reflection coefficients of all types of surface falling within this pixel. In the present context, this does not play a significant role in assessing the area of the types of LC in view of the small proportion of large urbanized territories.

The resulting LC maps were analyzed in QGIS Desktop 2.18 (MOLUSCE – Modules for Land Use Change Simulations). MOLUSCE makes it possible to partly automate the analysis of the dynamics of the spatial structure from a series of maps or satellite images displaying the current state of the territory, for different periods of time [23].

RESULTS AND DISCUSSION

As a result of the classification of multitemporal data, we obtained a number of LC maps corresponding to the imaging dates (Fig. 2) and carried out a spatiotemporal analysis of LC of the key river basins at the level of groups of landscapes (Tables 2–5). Results of analysis are used to compile transition matrices [24, 25, 26] which describe the spatial frequency of transitions of the outlines of different landscape units to one another on images from different years (Fig. 3).

The Kasmala–Barnaulka key territory. The indices of groups of landscapes [27] correspond to the subtypes of landscapes (natural subzones): dry steppe (I), moderately dry steppe (II), and southern forest-steppe (III). We identified the kinds of landscapes: zonal watershed-loess (A), intrazonal halohydromorphic (B), and extrazonal psammomorphic (C). The names of the groups of landscapes are formed by a matrix method: for instance, I-A – group of dry steppe zonal watershed-loess landscapes, etc.

The Bol'shaya Rechka basin. The indices of the groups of landscapes are the same as those described above for the Kasmala–Barnaulka key territory: subtype of landscapes (natural subzone) – middle forest-steppe (IV). The kinds of landscapes – zonal and intrazonal (AB) and extrazonal psammomorphic (C).

The Maima basin. The indices of groups of landscapes [28]: provinces – Northern Altai (c), Northeastern Altai (d); altitudinal belts – forest-steppe

belt (1), forest belt (2). 1-c – expositional forest-steppe of the low-mountain portion of the basin, including the lower reaches of the Maima valley; 2-c – subtaiga and mountain-taiga subbelts of the low mountains and middle mountains of the basin, including the main part of the Maima valley, and 2-d – chern-taiga and mountain-taiga subbelts of the low mountains and middle mountains of the basin, including the valleys of the right tributaries of the Maima.

The Belaya basin. The indices of groups of landscapes [28]: Northwestern Altai province (b); altitudinal belts – forest-steppe (1), forest (2 and subalpine (3). 1-b – expositional forest-steppe of the low-mountain portion of the basin, including the lower reaches of the Belaya valley; 2-b – chern-taiga and mountain-taiga subbelts of the low mountains and middle mountains of the basin, including the main section of the Belaya valley and its tributaries, and 3-b – subgoletz-subalpinotype middle mountains (massifs) and pseudo-goletz low mountains (separate highest summits).

On the Kasmala–Barnaulka key territory, all types of LC are the most stable across time. However, a gradual decrease in the contribution (8 %) from croplands (AS) was recorded, which changed mainly to fallow lands and secondary steppes and, to a lesser extent, to forests. This process has been observed from the time of total plowing (development of virgin and fallow lands) during 1954–1961. Within the zonal landscapes of the three subzones (I-A–III-A), the decrease made up from 4 to 12% of the area of the respective groups of landscapes. A far larger decrease in the contribution from croplands (from 9 to 17%) is characteristic for the intrazonal landscapes (I-B–III-B). Here, unlike the zonal groups where this process was evolving more or less uniformly, an abrupt decrease is seen on the image from 2001. The plowing within the intrazonal groups of landscapes is limited by light mechanical composition of the soils (sandy loams, light loams and sands), and by the paleohydromorphism with which an abundance of salinized inconvenient-to-cultivate is associated. These factors promoted an active transition of croplands to fallow lands and pastures.

GSW are the most dynamical type. There is a possibility for their transition to croplands, overgrowing with forest or flooding from water bodies. A directional increase in the area of this type is generally proportional to a decrease in the areas of AS. The largest increase in the contribution from GSW occurs within the zonal (by 16%) and intrazonal (by 22%) landscapes of the southern forest-steppe subzone. In the other subzones, the increase is somewhat smaller: by as small as 6% on the ouvals and even smaller in the intrazonal landscapes. The increase in the contribution from this type of LC in the southern forest-steppe may well be caused not only by the transition of the cropland to the fallow land but also by disafforestation.

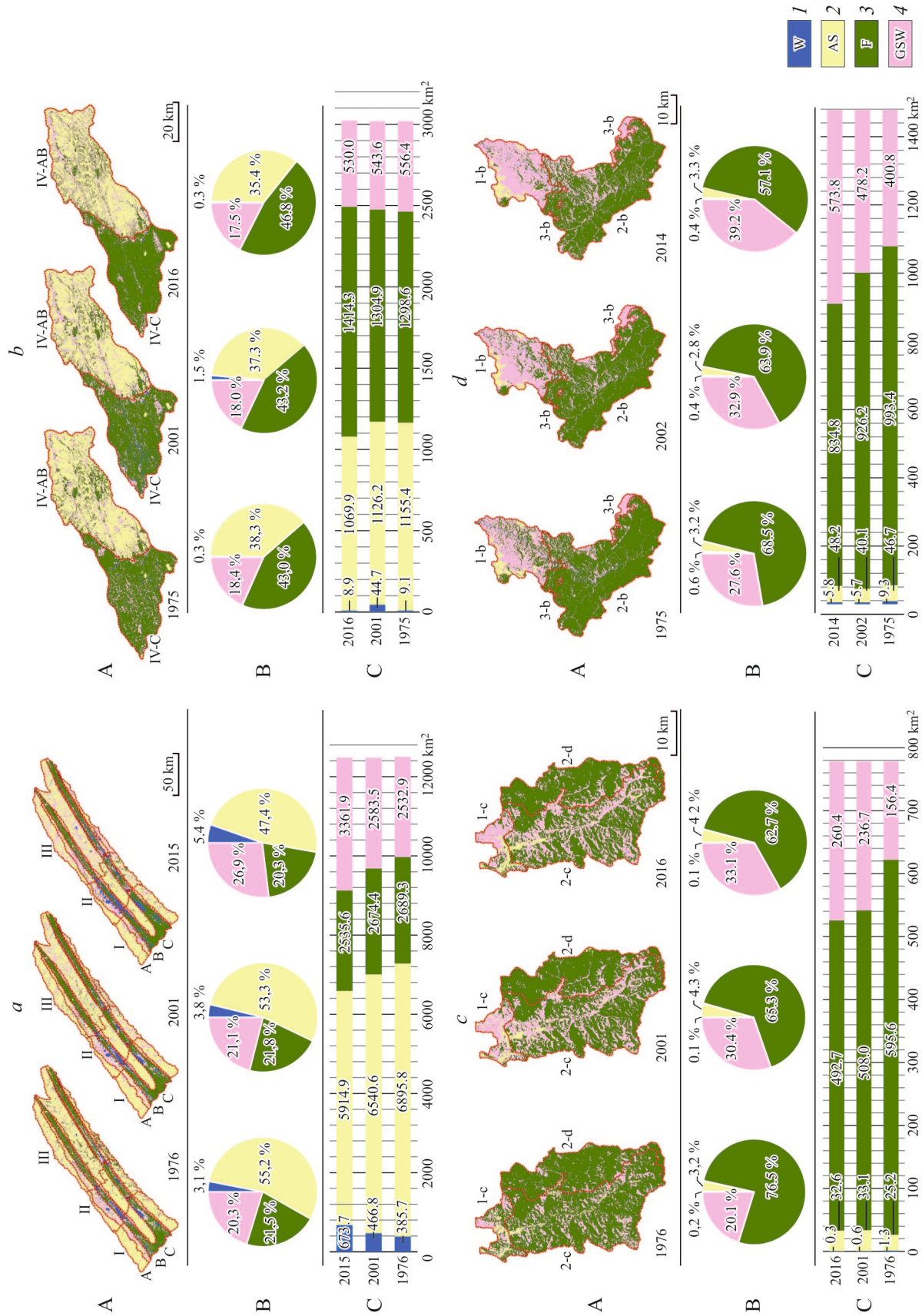


Fig. 2. Spatial distribution of the types of land covers (A), their relationship (%) (B) and of changes in their areas (km²) (C) for the key drainage basins. Key drainage basins: *a* – Kasmala-Barnaulka, *b* – Bol'shaya Rechka, *c* – Maima, *d* – Belaya. IV-AC, 1-b, etc. – index of the group of landscapes (for explanation, see the text).

Table 2. Matrices of land cover change of the Kasmala-Barnaulka key territory for groups of landscapes

L	1976 → 2001	W	AS	F	GSW	2001 → 2015	W	AS	F	GSW	S 1976, km ²	S 2001, km ²	S 2015, km ²
I-A	W	47.06	17.65	0	35.29	W	59.76	3.66	10.98	25.61	0.11	0.52	3.52
	AS	0.01	92.19	0.16	7.64	AS	0.10	89.36	1.49	9.05	1650.29	1612.56	1520.6
	F	0	35.14	10.02	54.84	F	0.16	28.49	61.64	9.71	30.8	8.04	52.04
	GSW	0.15	49.70	1.47	48.67	GSW	0.70	34.81	10.35	54.14	161.47	221.56	267.27
I-B	W	70.71	22.49	3.40	3.40	W	83.05	0.36	8.59	8.00	4.33	5.34	14.57
	AS	0.18	66.54	0.49	32.79	AS	1.98	54.12	4.29	39.62	242.14	265.38	177.84
	F	0.04	21.21	19.90	58.85	F	19.98	1.00	70.77	8.24	15.18	7.67	51.81
	GSW	0.76	41.30	1.36	56.58	GSW	1.47	15.02	15.27	68.24	242.3	225.56	260.58
I-C	W	97.44	1.34	0.29	0.93	W	97.71	0.04	1.67	0.58	128.68	148.23	185.21
	AS	17.75	11.91	26.28	44.05	AS	19.43	4.91	39.21	36.44	62.05	36.68	3.5
	F	0.36	1.10	91.87	6.67	F	0.85	0.02	95.99	3.15	786.34	837.99	933.52
	GSW	4.17	8.79	45.91	41.14	GSW	15.24	0.89	65.40	18.47	215.41	169.57	72.1
II-A	W	75.81	4.84	8.06	11.29	W	57.71	4.57	6.29	31.43	0.4	1.12	4.93
	AS	0.02	90.68	0.22	9.08	AS	0.20	89.84	1.37	8.59	1100.08	1082.28	1045.3
	F	0.03	23.75	18.73	57.49	F	0.58	6.35	61.36	31.71	88.08	26.2	62.35
	GSW	0.32	35.49	4.04	60.15	GSW	0.76	27.61	12.03	59.60	179.59	258.54	256.28
II-B	W	96.44	2.28	0.56	0.72	W	98.13	0.38	0.22	1.27	24.96	56.1	90.24
	AS	5.46	61.80	1.70	31.04	AS	5.53	55.39	2.42	36.66	236.37	226.59	182.3
	F	0.58	14.46	6.91	78.05	F	26.00	4.28	30.16	39.56	41.12	21.13	35.36
	GSW	5.59	21.89	4.18	68.34	GSW	5.03	16.41	6.91	71.66	338.02	336.67	334.37
II-C	W	95.82	1.60	0.89	1.69	W	98.01	0.06	0.49	1.44	148.81	158.24	187.05
	AS	11.49	19.12	45.90	23.48	AS	18.60	13.73	12.33	55.35	43.82	34.64	10.12
	F	0.77	1.88	87.47	9.88	F	4.09	0.14	71.98	23.79	274.94	312.6	258.36
	GSW	6.19	13.61	36.85	43.35	GSW	12.57	4.81	27.81	54.80	137.5	99.58	150.82
III-A	W	57.34	26.95	4.42	11.30	W	72.87	8.30	0.92	17.90	8.55	15.21	33.13
	AS	0.13	84.81	1.38	13.69	AS	0.44	83.67	0.17	15.73	2877.97	2701.99	2467.62
	F	0.83	28.48	17.00	53.70	F	2.70	14.23	7.42	75.65	224.2	128.24	20.9
	GSW	0.99	40.03	10.29	48.69	GSW	0.89	24.62	0.88	73.60	487.35	752.65	1082
III-B	W	74.79	17.06	2.92	5.23	W	86.17	1.24	2.66	9.93	16.88	22.06	37.56
	AS	0.39	73.34	2.31	23.96	AS	1.55	66.11	0.63	31.71	528.88	515.01	407.81
	F	1.27	20.72	22.10	55.91	F	6.51	5.56	24.55	63.39	149.44	85.86	34.57
	GSW	1.76	30.01	12.91	55.33	GSW	1.26	15.98	2.49	80.27	310.89	383.17	529.3
III-C	W	87.35	3.26	6.06	3.33	W	95.57	0.12	1.89	2.42	52.48	58.83	100.77
	AS	2.71	30.09	44.58	22.62	AS	9.70	45.37	8.70	36.22	104.01	53.63	38,25
	F	0.21	0.61	94.78	4.39	F	2.10	0.36	82.52	15.02	1069.19	1234.39	1048.84
	GSW	3.00	5.36	65.39	26.25	GSW	9.34	6.62	15.87	68.18	262.23	141.06	303.27

Note. Here and in Tables 3–5, variations are expressed as a percentage of the total area of the type of land covers, L – index of the group of landscapes, and S – total area of the type of land covers for the respective time slice.

Table 3. Matrices of land cover change within the Bol'shaya Rechka river basin for groups of landscapes

L	1975 → 2001	W	AS	F	GSW	2001 → 2016	W	AS	F	GSW	S 1975, km ²	S 2001, km ²	S 2016, km ²
IV-AB	W	57.41	14.81	15,43	12,35	W	44.22	13.18	20.49	22,11	0.58	7.24	6.02
	AS	0.21	82.55	2,15	15,09	AS	0.08	81.41	3.31	15,20	1142.13	1117.55	1060.86
	F	0.47	14.10	59,90	25,53	F	0.45	12.87	60.11	26,58	274.95	248.8	256.34
	GSW	0.96	40.32	17,66	41,06	GSW	0.23	31.69	18.03	50,05	336.9	380.98	427.62
IV-C	W	30.98	0	48,35	20,67	W	6.09	0.18	86.90	6,83	8.52	37.5	2.94
	AS	1.83	63.54	21,79	12,84	AS	0.03	78.67	14.39	6,91	14.72	11.81	9.82
	F	2.28	0.14	86,73	10,85	F	0.04	0.04	95.83	4,10	1024.04	1055.71	1151.9
	GSW	5.09	0.47	72,76	21,67	GSW	0.16	0.02	66.18	33,63	220.25	162.51	101.05

Table 4. Matrices of land cover change within the Maima river basin for groups of landscapes

L	1976 → 2001	W	AS	F	GSW	2001 → 2015	W	AS	F	GSW	S 1976, km ²	S 2001, km ²	S 2016, km ²
1-c	W	29.82	22.02	9.17	38.99	W	26.00	46.00	24.00	4.00	0.79	0.34	0.18
	AS	0.43	53.08	1.77	44.72	AS	0.12	56.41	5.78	37.69	12.5	15.27	13.23
	F	0.10	14.51	26.44	58.95	F	0.10	0.97	86.36	12.56	29.51	10.38	13.81
	GSW	0.09	14.92	8.15	76.84	GSW	0.14	9.23	8.55	82.09	28.05	44.84	44.33
2-c	W	14.17	28.35	10.24	47.24	W	5.00	36.67	20.00	38.33	0.46	0.22	0.1
	AS	0.38	47.36	7.97	44.28	AS	0	42.73	10.87	46.41	11.33	15.94	17.4
	F	0.02	1.83	77.18	20.97	F	0.01	0.13	88.71	11.15	355.11	292.81	277.33
	GSW	0.04	3.75	16.83	79.38	GSW	0.04	6.16	9.24	84.56	105.63	163.56	179.02
2-d	W	0	0	100.00	0	W	100.00	0	0	0	0	0.03	0.03
	AS	0	33.98	20.46	45.56	AS	0	21.18	51.09	27.73	0.93	1.14	1.43
	F	0	0.33	92.85	6.81	F	0	0.03	94.72	5.26	206.93	201.47	195.04
	GSW	0.09	0.63	43.28	56.00	GSW	0	4.29	11.76	83.96	21.14	26.36	33.22

Table 5. Matrices of land cover change within the Belaya river basin for groups of landscapes

L	1975 → 2002	W	AS	F	GSW	2002 → 2014	W	AS	F	GSW	S 1975, km ²	S 2002, km ²	S 2014, km ²
1-b	W	64.70	0.07	6.04	29.20	W	91.81	0	1.46	6.73	5.43	3.69	3.79
	AS	0	68.88	0.57	30.55	AS	0.04	89.44	0.02	10.50	46.4	39,68	47.02
	F	0.05	0.99	57.18	41.78	F	0.13	0.07	57.35	42.44	100.82	73.32	47.46
	GSW	0.05	2.61	5.85	91.49	GSW	0.10	3.81	1.80	94.29	257.57	293.53	312.84
2-b	W	45.66	–	27.74	26.60	W	86.23	–	10.14	3.62	3.82	1.99	1.99
	F	0.02	–	93.43	6.55	F	0.02	–	90.31	9.68	871.91	838.66	767.68
	GSW	0.06	–	21.33	78.60	GSW	0.10	–	6.95	92.95	107.52	142.6	213.84
3-b	F	–	–	62.59	37.41	F	–	–	79.77	20.23	17.92	11.76	12.82
	GSW	–	–	1.68	98.32	GSW	–	–	8.80	91.20	32.59	38.74	37.8

Note. Dash – no data for the type of land covers.

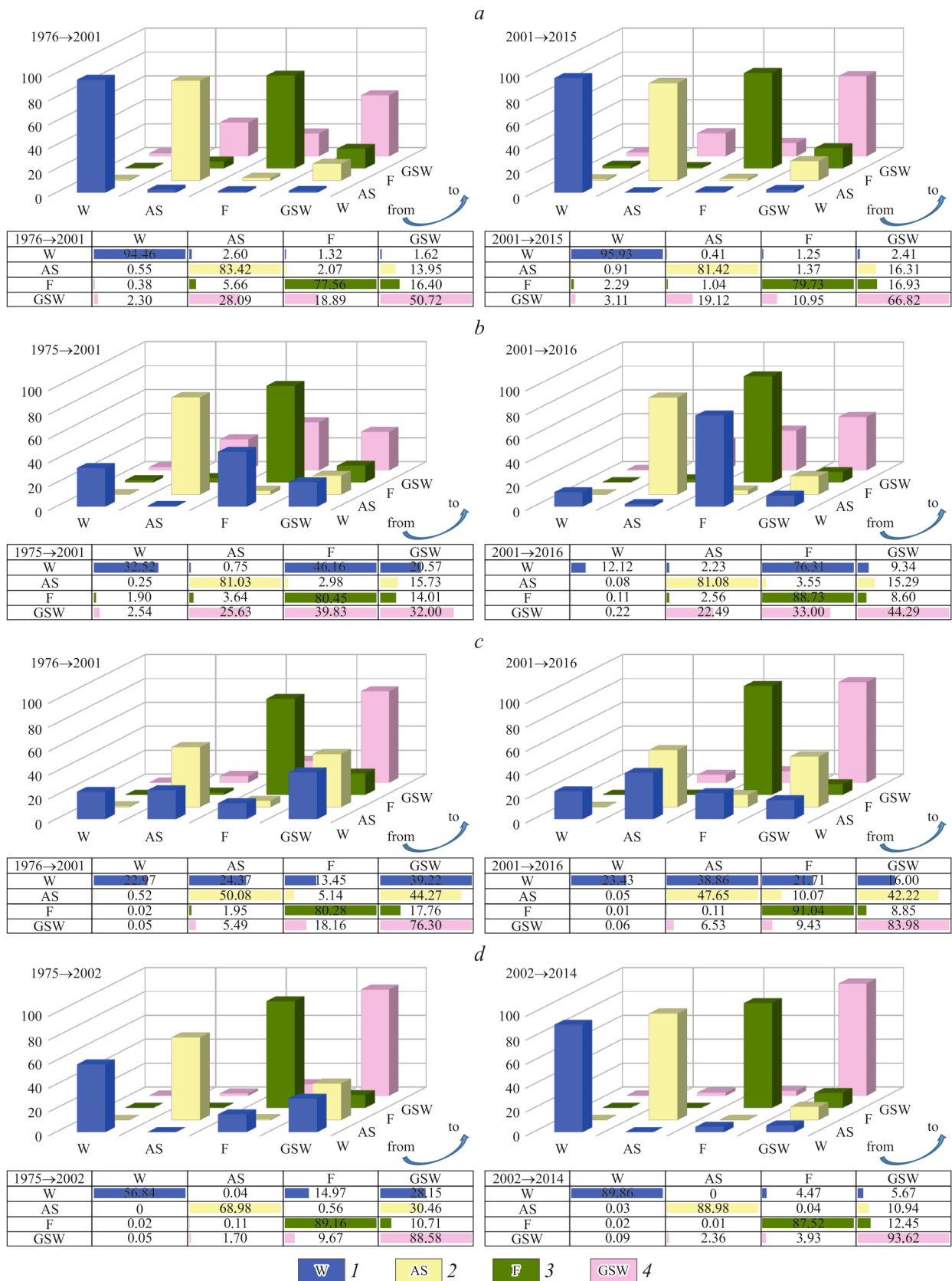


Fig. 3. Matrices of land cover change for the key drainage basins, % of the total area of the basin. Key drainage basins: *a* – Kasmala-Barnaulka, *b* – Bol’shaya Rechka, *c* – Maima, *d* – Belaya. 1 – water surface of lakes and ponds; 2 – agricultural lands and settlements; 3 – forests; 4 – natural grass communities.

Across the entire area of Kasmala–Barnaulka the forests changed little their areas (by a mere 4%). For separate groups of landscapes, however, this process differed greatly. Within the groups of landscapes I-A, I-B and II-A, II-B, the largest decrease in the proportion of forests was observed in 2001. Changes occurred within 2–9%, and in 2015 the contribution from forests in the dry-steppe subzone increased relative to 1975 but decreased in the moderately dry steppe. Furthermore, the dry steppe subzone shows a consistent increase in the contribution from forests (by 12% for the entire period) within the extrazonal © group of landscapes.

The situation is highly contrasting with forests within all groups of landscapes of the southern forest-steppe subzone. As regards the kinds of landscapes A and B, there is taking place a substantial decrease in the proportion of forests making up 6 and 11%, respectively. Within landscapes of kind A, the area of separated forest stand and balka forests decreased by more than a factor of 10, and the transitions occurred mostly to natural grass communities. A decrease after 2001 (the year in which the largest area of forests was recorded) in the proportion of forests also took place for kind C, making up 13%. Considering that this type includes all forests (including different anthropogenic modifications), the decrease in the area of pure pine forests was likely to be even larger.

Within the Bol'shaya Rechka basin the proportion of all types of LC in the overall structure changes little and does not exceed 1–3%. The area of AS remains virtually the same for the entire time period (within 3%). However, there occur direct and reverse transitions between this type of LC and GSW which are likely caused by the reciprocal spatial transposition (for instance, abandoned cropland → fallow, and fallow or secondary steppe → cropland). Unlike Kasmala–Barnaulka, the contribution from GSW is insignificant in this case, although it is decreasing. This is due to a decrease in the area of this type (by 9%) in IV-C where it actively changes to forests (see Table 2). Within IV-AB, on the contrary, the contribution from natural grass communities increases (by 5% for the entire period).

The contribution from forests does not increase substantially across the entire basin (up to 3%). This occurs in spite of an increase in their area within IV-C (by 10%) where they were gradually occupying the areas of GSW. This process is driven by two factors: in the first place, regeneration of the areas of final cutting and, second, formation of swamp-subors on waterlogged territories. However, there also occur GSW in place of the forest, which was most likely caused by new felling or fires mostly in the vicinities to large settlements. Within IV-AB there occurs a slight decrease in the contribution from (as small as 1%) caused by felling, fires, etc. (an identical transformation in AS and GSW).

Noteworthy is the dynamics of the areas of the water bodies within the lowland basins under consideration. Unlike the Bol'shaya Rechka basin, there also exist large natural lakes, in addition to the ponds, on the Kasmala–Barnaulka territory. The investigations within the Kasmala basin showed that the area of the ponds was gradually decreasing after their maximal development in the mid-1980s [29]. According to the three time slices considered in this study, there is an increase in the proportion of the areas of W from 3.08% in 1976 to 5.40% in 2015 r. within the basins of the Kasmala–Barnaulka territory. Nevertheless, most likely these changes are not unidirectional but are associated with the hydrothermal conditions of a particular year.

The Bol'shaya Rechka basin showed in 2001 an increase in the area of W, largely due to the construction of hydropower structures (by a factor of 12 in the group of landscapes IV-AB). During 2001–2016, in the IV-AC group this type of LC remained relatively stable, decreasing slightly its area because of the disappearance of a number of ponds. At the same period the group of landscapes IV-C showed a significant reduction in the area of the water bodies caused by vegetation infill of the lakes.

The LC structure underwent the largest transformation across time. While W and AS change weakly their contributions in the LC structure, F and GSW are the most dynamical. Actually, the transitions occur mainly between these two types of LC. Currently the two basins show the main tendency for a dramatic decrease of the contribution of forests in the LC structure (by 11–14%). In the Belaya basin, the largest decrease (actually more than half the area) occurred in the most developed forest-steppe portion of the basin (1-c) where forests grew in expositionally favorable areas. In the vastest portion of the basin belonging to forested low mountains (2-b), the areas of forests also decreased (by 11%), which occurred even in spite of the establishment of the Tigirek nature reserve in the upriver basin. In the Maima basin, the largest reduction in forests occurred within the subtaiga and mountain-taiga portion (2-c) (by 17%). These territories are also relatively well developed and, considering the fact that the slope surfaces are dominant, a reduction in forested areas creates serious risks of hazardous hydrological processes [30].

For comparing the key basins, we constructed the matrix of Pearson correlation coefficients (Table 6) reflecting the degree of correlation between basins according to the proportion of the area of each type of LC for three time slices (12 pairs of data). The closest correlations at the significance level $p < 0.05$ are observed between the Maima and Belaya basins. As pointed out above, the changes in LC in these basins show very similar tendencies. The correlations between

Table 6. Matrix of Pearson correlation coefficients for the LC structure of drainage basins (1975–2015).

	Kasmala-Barnaulka	Belaya	Bol'shaya Rechka	Maima
Kasmala-Barnaulka	1.00			
Belaya	–0.12	1.00		
Bol'shaya Rechka	0.66	0.52	1.00	
Maima	–0.11	0.96	0.62	1.00

Note. Values of a significant correlation are printed in bold.

the Kasmala–Barnaulka and Bol'shaya Rechka basins are also significant. The correlation between them is not as close, perhaps because of a substantial difference in the course of development of the water bodies. Furthermore, there is a reliable correlation between the Maima and Bol'shaya Rechka basins. The fact that forests are dominant in the LC structure makes the Bol'shaya Rechka basin similar to mountain basins.

CONCLUSIONS

For the territory of the Altai region the algorithm of quantitative analysis of the land cover dynamics (land use/land cover change) for 1975–2016 has been tested on the basis of multi-temporal Landsat images. As the model sites, four representative drainage basins (Kasmala–Barnaulka, Bol'shaya Rechka, Maima and Belaya) were used, which illustrate the landscape diversity and different moralities of nature management in the region. A specific feature of this research that distinguishes it from foreign efforts is the fact that the spatiotemporal dynamics of land covers within the basins is assessed for the main groups of landscapes.

The findings have shown that the dynamics of landscapes for the period under consideration has a specific character in different natural zones and subzones as well as within plain and mountain territories. The following peculiarities and regularities have been revealed:

- the lowland basins of the steppe and forest-steppe zones are characterized by a smaller amplitude of land cover change (as small as 8%) when compared with the mountain zones (up to 14%);

- most characteristic for the steppe and southern forest-steppe subzone (the left bank of the Ob) is a decrease in the proportion of arable (dominant in the area) lands, and a high natural dynamics of water bodies;

- the forest-steppe zone (the right bank of the Ob) shows the smallest dynamics of all types of land covers (as small as 4), with a significant dynamics of artificial water bodies (group of landscapes IV-AB within the Bol'shaya Rechka basin: 0.58 km², 7.24 and в 1976 г., 7.24 km² в 2001 г. и 6.02 km² в 2016 г. in 1976, 2001 and 2016, respectively) and

- the mountain basins dominated by forested areas (the Maima and Belaya rivers) are characterized by a

considerable decline in their proportion (down to 14%), largely in favor of the natural grass communities, as a result of the economic activities.

The algorithm used in this study can be employed in carrying out a comparative analysis of the transformations at the regional level, identifying the general evolutionary patterns of natural systems and modeling their state, and establishing the system of regional and global monitoring.

This work was done with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research (18–05–00007).

REFERENCES

1. Krenke, A.N. and Puzachenko, Yu.G., Mapping of the Main Functional Properties of Landscape Cover Using Remote Sensing Data in the Interests of the Early Stages of Planning Development of Hydrocarbon and Forest Resources, *Proc. XI Int. Landscape Conf. "Landscape Science: Theory, Methods, Regional research, Practice" (August 22–25, 2006, Moscow)*, Moscow: Moscow Univ., 2006, pp. 672–673 [in Russian].
2. Vitousek, P.M., Beyond Global Warming: Ecology and Global Change, *Ecology*, 1994, vol. 75, issue 7, pp. 1861–1876.
3. Ojima, D.S., Galvin, K.A. and Turner, B.L., The Global Impact of Land-Use Change: To Understand Global Change, Natural Scientists Must Consider the Social Context Influencing Human Impact on Environment, *BioScience*, 1994, vol. 44, issue 5, pp. 300–304.
4. Aide, T.M. and Grau, H.R., Globalization, Migration, and Latin American Ecosystems, *Science*, 2004, vol. 305, pp. 1915–1916.
5. Rudel, T.K., Coomes, O.T., Moran, E., Achard, F., Angelen, A., Xu, J.C., and Lambin, E., Forest Transitions: Towards a Global Understanding of Land Use Change, *Global Environ. Chang.*, 2005, vol. 15, issue 1, pp. 23–31.
6. Machlis, G.E. and Hanson, T., Warfare Ecology, *BioScience*, 2008, vol. 58, issue 8, pp. 729–736.
7. Baumann, M., Radeloff, V.C., Avedian, V., and Kuenmerle, T., Land-Use Change in the Caucasus During and After the Nagorno-Karabakh Conflict, *Reg. Environ. Change*, 2015, vol. 15, issue 8, pp. 1703–1716.
8. Prishchepov, A.V., Müller, D., Dubinin, M., Baumann, M., Radeloff, V.C., Determinants of Agricultural Land Abandonment in Post-Soviet European Russia, *Land Use Policy*, 2013, vol. 30, issue 1, pp. 873–884.

9. Kuemmerle, T., Hostert, P., Radeloff, V.C., der Linden, S., van, Perzanowski, K., and Krühlov, I., Cross-Border Comparison of Post-Socialist Farmland Abandonment in the Carpathians, *Ecosystems*, 2008, vol. 11, issue 4, pp. 614–628.
10. Wright, C.K., Beurs, K.M., de, and Henebry, G.M., Combined Analysis of Land Cover Change and NDVI Trends in the Northern Eurasian Grain Belt, *Front. Earth Sci. PRC*, 2012, vol. 6, issue 2, pp. 177–187.
11. Ioffe, G., Nefedova, T., Beurs, K. de, Land Abandonment in Russia, *Eurasian Geogr. Econ.*, 2012, vol. 53, issue 4, pp. 527–549.
12. Alcantara, C., Kuemmerle, T., Griffiths, P., Hostert, P., Knorn, J., Müller, D., Sieber, A., Baumann, M., Bragina, E.V., Radeloff V.C., Prishchepov, A.V., and Schierhorn, F., Mapping the Extent of Abandoned Farmland in Central and Eastern Europe Using MODIS Time Series Satellite Data, *Environ. Res. Lett.*, 2013, vol. 8, issue 3, p. 035035.
13. Griffiths, P., Müller, D., Kuemmerle, T., and Hostert, P., Agricultural Land Change in the Carpathian Ecoregion After the Breakdown of Socialism and Expansion of the European Union, *Environ. Res. Lett.*, 2013, vol. 8, issue 4, p. P. 045024.
14. Newell, J.P. and Simeone, J., Russia's Forests in a Global Economy: How Consumption Drives Environmental Change, *Eurasian Geogr. Econ.*, 2014, vol. 55, issue 1, pp. 37–70.
15. Houghton, R.A., Schlesinger, P., Stone, T.A., Butman, D., Bunn, A.G., and Krankina, O.N., Mapping Russian Forest Biomass With Data From Satellites and Forest Inventories, *Environ. Res. Lett.*, 2007, vol. 2, issue 4, p. 045032.
16. Peterson, U. and Aunap, R., Changes in Agricultural Land Use in Estonia in the 1990s Detected With Multitemporal Landsat MSS Imagery, *Landscape Urban Plan.*, 1998, vol. 41, issues 3–4, pp. 193–201.
17. Bergen, K.M., Brown, D.G., Zhao, T., Kharuk, V., Blam, Y., Peterson, L.K., and Miller, N., Changing Regimes: Forested Land Cover Dynamics in Central Siberia 1974 to 2001, *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 2008, vol. 74, issue 6, pp. 787–798.
18. Sieber, A., Kuemmerle, T., Prishchepov, A.V., Wendland, K.J., Baumann, M., Radeloff, V.C., Baskin, L.M., and Hostert, P., Landsat-Based Mapping of Post-Soviet Land-Use Change to Assess the Effectiveness of the Oksky and Mordovsky Protected Areas in European Russia, *Remote Sens. Environ.*, 2013, vol. 133, pp. 38–51.
19. Rafaela, P., Leone, A. and Boccia, L., Land Cover and Land Use Change in the Italian Central Apennines: A Comparison of Assessment Methods, *Appl. Geogr.*, 2009, vol. 29, issue 1, pp. 35–48.
20. Galakhov, V.P. and Syubaev, A.A., *Calculating the Runoff Volume of the First Flood Wave of the Ob at Barnaul*, Barnaul: Altai Univ., 2016 [in Russian].
21. GloVis. URL: <http://glovis.usgs.gov/> (Accessed 12.21.2016).
22. Xu, H., Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery, *Int. J. Rem. Sens.*, 2006, vol. 27, issue 14, pp. 3025–3033.
23. MOLUSCE. QGIS Python Plugins Repository. URL: <http://plugins.qgis.org/plugins/molusce/> (Accessed 12.12.2016).
24. Fan, F., Weng, Q. and Wang, Y., Land Use and Land Cover Change in Guangzhou, China, From 1998 to 2003, Based on Landsat TM /ETM+ Imagery, *Sensors*, 2007, vol. 7, issue 7, pp. 1323–1342.
25. Ramachandra, T.V., Uttam, K. and Joshi, N.V., Landscape Dynamics in Western Himalaya – Mandhala Watershed, Himachal Pradesh, India. *AJG*, 2012, vol. 12, no. 1. URL: <http://www.geoinfo.ait.asia/ajg/index.php/journal/article/view/31/14/> (Accessed 12.12.2016).
26. Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D., and Knoke, T., Land Use/Land Cover Change Analysis Using Object-Based Classification Approach in Munessa-Shashemene Landscape of the Ethiopian Highlands, *Remote Sens.*, 2013, vol. 5, issue 5, pp. 2411–2435.
27. Chernykh, D.V. and Zolotov, D.V., *Spatial Organization of the Barnaulka River Basin*, Novosibirsk: SO RAN, 2011 [in Russian].
28. Chernykh, D.V. and SamoiloVA, G.S., *Landscapes of Altai (Republic of Altai and Altai Krai). The 1:500 000 Map*, Novosibirsk: FGUP Novosibirskaya Kartograficheskaya Fabrika, 2011 [in Russian].
29. Chernykh, D.V., Biryukov, R.Yu., Zolotov, D.V., and Vagner, A.A., Anthropogenic Modifications and Transformations of Landscapes Within the Kasmala River Basin: Classification and Dynamics from Remotely Sensed Data, *Vestn. Altaiskoi Nauki*, 2014, no. 1, pp. 233–240 [in Russian].
30. Lubenets, L.F. and Chernykh, D.V., Role of Anthropogenic Modifications in the Landscape-Hydrological Organization of the Maima River Basin, *Vestn. Volgogr. Univ.*, Ser. 11, Estestvennye Nauki, 2015, no. 1 (11), pp. 64–71 [in Russian].