

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.

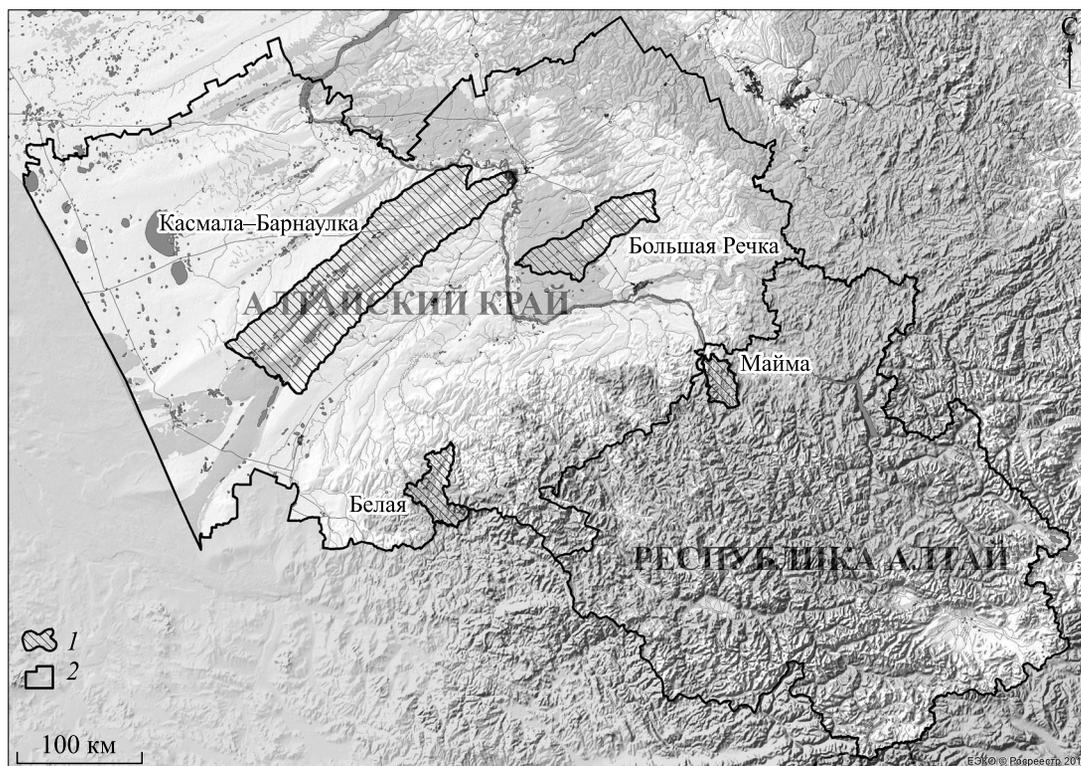


Рис. 1. Положение ключевых бассейнов в пределах Алтайского края и Республики Алтай.

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 чернево-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).

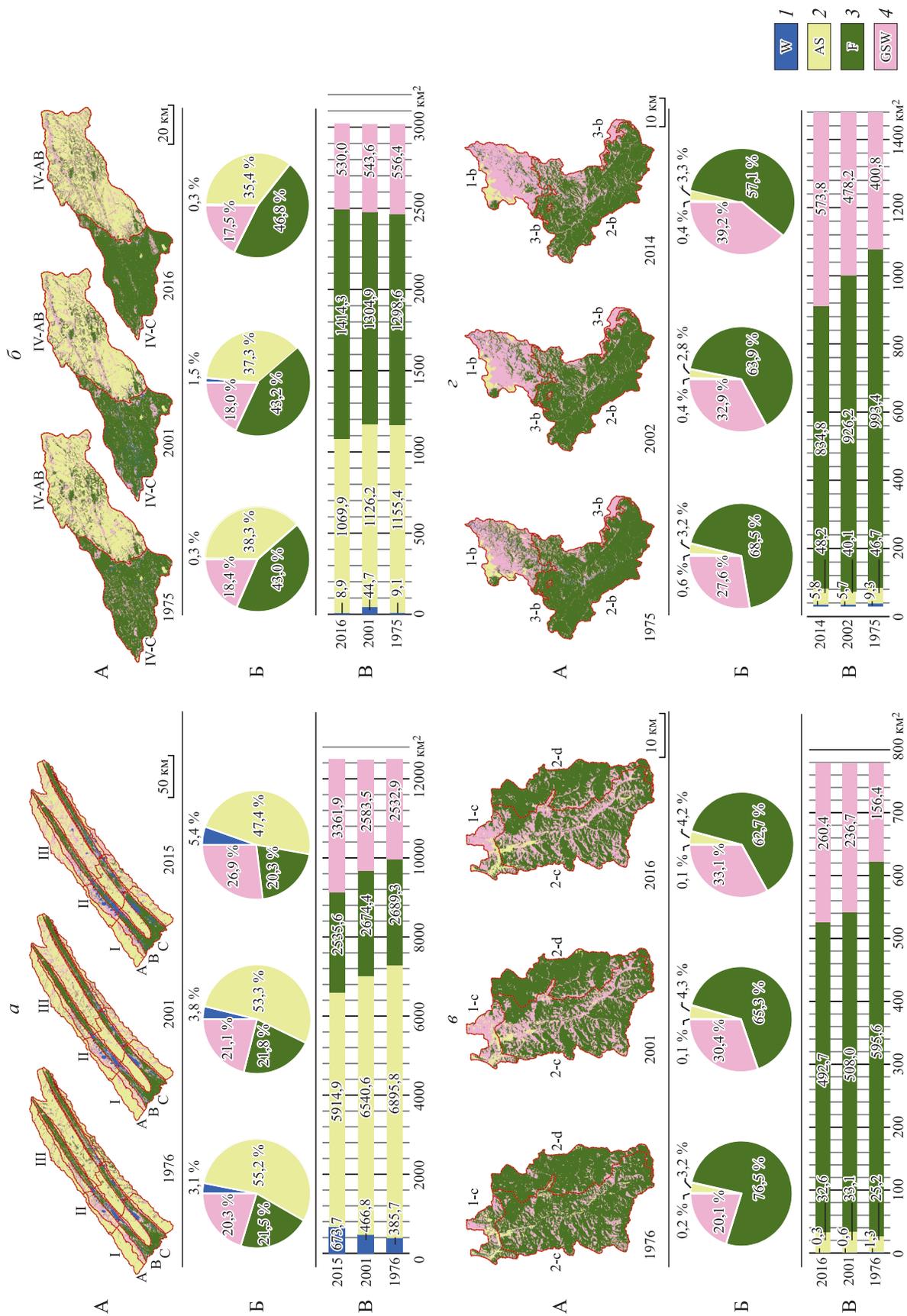


Рис. 2. Пространственное распределение типов наземных покровов (А), их соотношение (Б) и изменения их площадей (В) по ключевым водосборным бассейнам.
Ключевые водосборные бассейны: а — Касмала–Барнаулка, б — Белая. IV-AB, 1-б и т. п. — индекс группы ландшафтов (пояснения см. в тексте).

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,

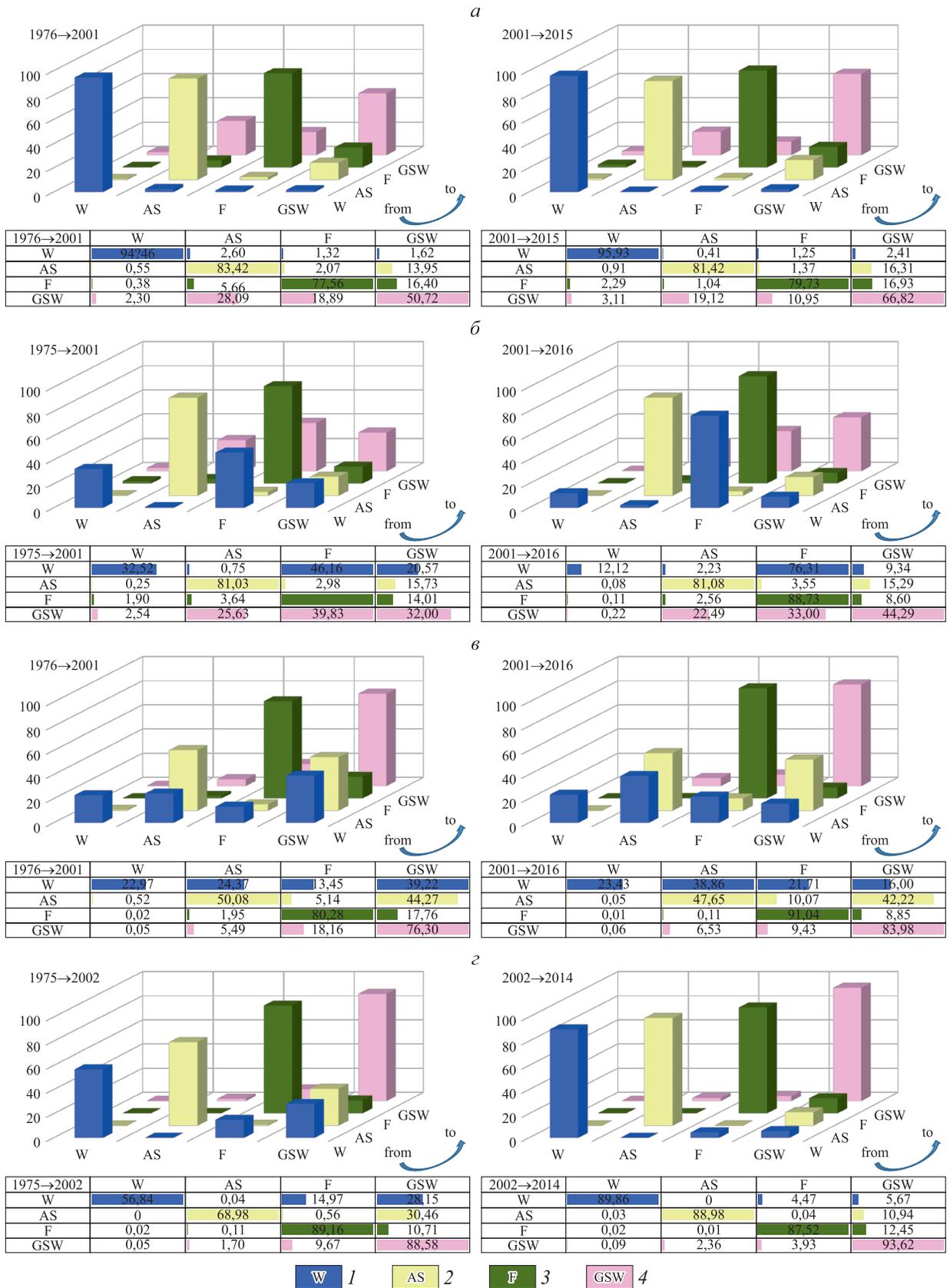


Рис. 3. Матрицы изменений наземных покровов по ключевым водосборным бассейнам, % от общей площади бассейна.

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.