

КРУПНОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ БАСЕЙНА Р. КАСМАЛА (АЛТАЙСКИЙ КРАЙ)

Бирюков Р.Ю.^{1*}, Черных Д.В.^{12**}

¹Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, *Россия*

²Алтайский государственный университет, *Россия*

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

Аннотация

Проведено крупномасштабное картографирование пространственной организации геосистем территории неоднородного в природном отношении и по режимам хозяйственного использования бассейна р. Касмала (Приобское плато, Алтайский край, Россия) на основе разнородной пространственно-распределенной информации. На первоначальном этапе на основе цифровой модели получена серия карт ключевых морфометрических характеристик рельефа (карта экспозиций, карта уклона, карта горизонтальной кривизны, карта вертикальной кривизны и т.д.). Параллельно на основе ДДЗ была построена карта современного (актуального) состояния наземных покровов (land covers). В результате получена крупномасштабная карта, представляющая собой набор уникальных базовых контуров, содержащих информацию о характеристиках рельефа, поверхностных отложений, актуальном состоянии почвенного и растительного покровов. На следующем этапе проведен анализ пространственно-временных изменений структуры бассейна. Использована серия разновременных космических снимков Landsat для трех временных срезов. Предложен и апробирован алгоритм, позволяющий анализировать актуальное состояние ландшафтов и выделять основные векторы их временных преобразований.

Ключевые слова: ландшафт, наземные покровы, дистанционное зондирование, геоинформационные системы, Алтайский край

Введение

Использование приемов «синтетического» ландшафтного картографирования крайне популярно в современных географических исследованиях [1, 2, 3]. Данный прием имеет ряд преимуществ, по сравнению с «классическим»: общность инструментов, воспроизводимость алгоритмов и фиксированность параметров, сравнимость результатов, возможность обработки «больших данных». Разработанные в результате такого подхода картографические модели и тематические базы данных, объединенные в геоинформационные системы (ГИС) различного иерархического уровня и территориального охвата, востребованы при проведении экологических и ресурсных оценок, геоэкологическом прогнозировании, территориальном планировании.

В данном исследовании проведено крупномасштабное картографирование на основе интеграции разнородной пространственно-распределенной информации средствами ГИС. В качестве источников данных послужили цифровая модель рельефа (ЦМР), материалы космической съемки и база данных наземных наблюдений.

При изучении ландшафтной структуры одной из важнейших задач является анализ ключевых морфометрических показателей геосистем. ЦМР и методы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) в последнее время очень широко применяются в ландшафтных исследованиях. В частности, использование ЦМР позволяет автоматизировать многие процедуры и алгоритмы геоморфологического анализа, среди которых изучение процессов движения и аккумуляции водных потоков [4].

В работе рассмотрена динамика пространственно-временной организации ландшафтов бассейна р. Касмала. Анализ динамики по разновременным космическим снимкам является наиболее корректным методом выявления динамики природной среды, Он позволяет получить точные данные о пространственных механизмах переходов одних структурных элементов в другие в процессе как разрушительных, так и восстановительных смен [5]. Исследования пространственно-временных изменений ландшафтов имеют основополагающее значение для понимания многочисленных социальных, экономических и экологических проблем [6] и может предоставить ценные сведения для принятия соответствующих управленческих решений.

Территория исследования

Исследования проводились в бассейне р. Касмала (Приобское плато, Алтайский край, Россия; рис. 1).

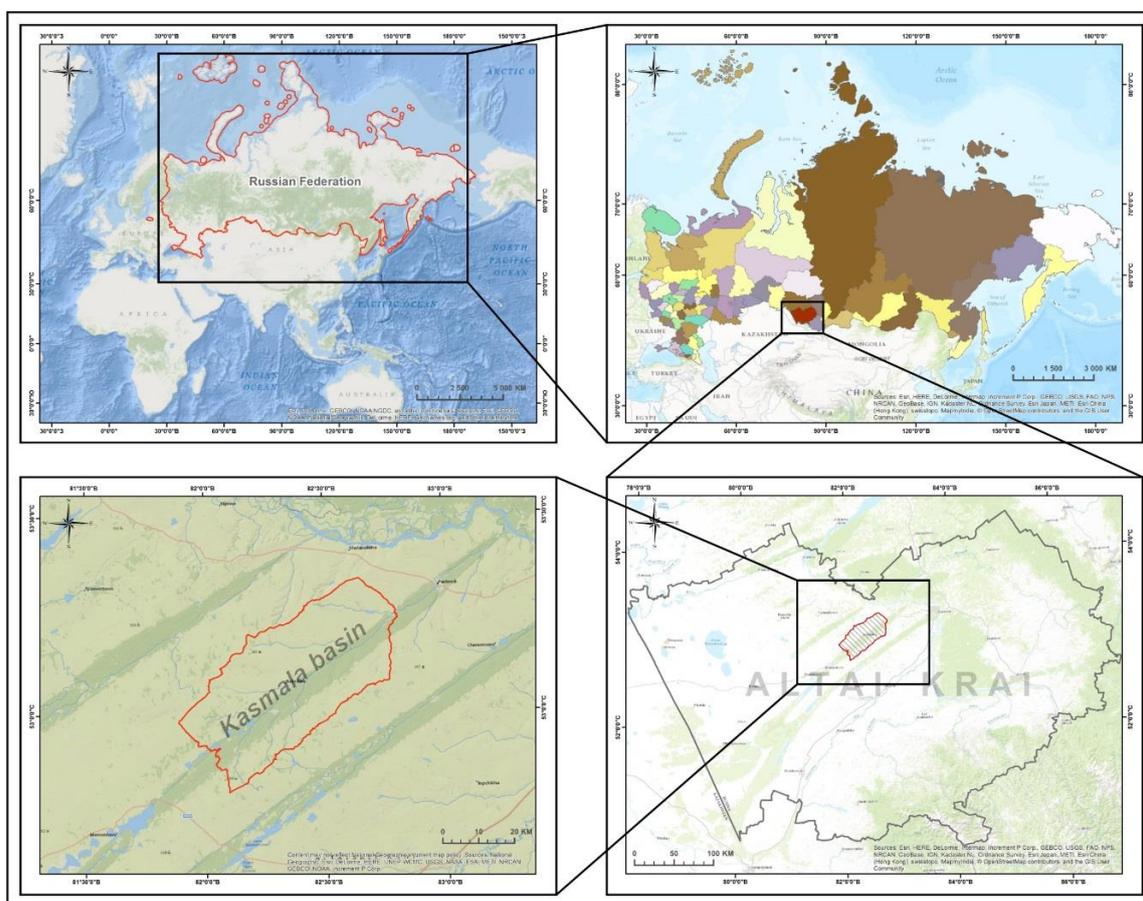


Рисунок 1. Территория исследования: бассейн р. Касмала на Приобском плато

Река Касмала – левый приток р. Обь. Её бассейн ($S - 1768,48 \text{ км}^2$) расположен в восточной части Приобского плато, которое представляет собой волнистую возвышенную равнину, разрезанную на отдельные увалы ложбинами древнего стока [7].

Выбор территории исследования обусловлен рядом причин, отмеченных в работах [8–9]. Территория бассейна р. Касмала подвержена значительной антропогенной нагрузке: поверхности увалов фактически полностью распаханы, на малых реках и в овражно-балочных системах построено большое количество прудов, а расположенные на днище ложбины древнего стока сомкнутые сосновые леса, служащие важнейшей сырьевой базой региона, замещаются различными модификациями (разреженными, мелколиственно-сосновыми и др.). Все это говорит о

необходимости получения полной и актуальной информации о масштабах и пространственно-временных характеристиках этого объекта.

Ландшафтная структура бассейна неоднородна. Основными элементами ландшафтной структуры в пределах рассматриваемого бассейна являются: юго-восточный макросклон Кулундинско-Касмалинского (левый борт), северо-западный макросклон Касмалинско-Барнаульского (правый борт) увалов и разделяющее их днище Касмалинской ложбины древнего стока, лишь небольшую часть которой занимает современная долина р. Касмалы.

Материалы и методы

Алгоритм настоящего исследования (рис. 2–3), состоящий из двух блоков, основан на интеграции ГИС-технологий, методов обработки разновременных космических снимков и данных наземных наблюдений. В целях создания основы для крупномасштабной основы ландшафтной карты бассейна р. Касмала использованы следующие исходные материалы: топографические карты масштабов 1:25000–1:100000; материалы космической съемки Landsat TM; данные геопорталов Google maps, Bing Maps и др.; почвенные и геоботанические карты из фондов ИВЭП СО РАН; данные полевых ландшафтных описаний. Подготовка картографической основы осуществлялась в несколько этапов (рис. 2): формирование единой персональной базы данных и приведение их к единой системе координат; построение ЦМР изучаемого бассейна на основе крупномасштабных топографических карт; морфометрический анализ ЦМР; разработка карты наземных покровов (НП) на основе дешифрирования космических снимков; интеграция дистанционной информации и данных анализа ЦМР [10].

Схема обработки разновременных космических снимков для создания картографической основы и анализа пространственно-временных изменений ландшафтов включает в себя этапы:

1 – отбор и получение снимков; 2 – предклассификационная обработка; 3 – классификация; 4 – постклассификационная обработка; 5 – верификация и модификация полученных материалов; 6 – сопоставление разновременных данных; 7 – анализ пространственно-временных изменений [11].



Рисунок. 2. Алгоритм построения ландшафтной картографической основы бассейна р. Касмала

В качестве данных ДЗЗ в настоящем исследовании выбраны данные со спутников серии Landsat (сканеры MSS, ETM+, OLI). Накопленные и находящиеся в открытом доступе [12] глобальные архивы данных, дают крайне широкие возможности ретроспективного анализа. Снимки Landsat имеют большое число спектральных каналов, высокое пространственное разрешение, широкий временной охват и свободный доступ к базе данных.



Рисунок 3. Алгоритм пространственно-временного анализа ландшафтов бассейна р. Касмала

Для территории исследования использовались космические снимки: Landsat 2 MSS (1976.05.09, path/row 160/23), Landsat 7 ETM (2001.05.02, path/row 148/23), Landsat 8 OLI (2015.05.01, path/row 148/23).

При подборе данных ДЗЗ важно использовать разногодичные снимки но за близкие даты одного сезона, что уменьшает вероятность принять сезонные изменения за многолетние.

Автоматизированная классификация проводилась в несколько этапов. На первом этапе была создана маска сельскохозяйственных угодий, т.к. при классификации возникали проблемы, связанные с отделением данного типа наземного покрова от окружающих вследствие 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 применением разностного водного индекса (MNDWI) [13].

При анализе изменений НП в работе использованы космические снимки, полученные разными съемочными системами и имеющие различные характеристики, в том числе пространственное разрешение. Сравнение таких снимков может привести к ошибочным выводам об изменении НП, особенно малых объектов, ввиду различной полноты дешифрирования на сравниваемых снимках, исключения из анализа объектов, отображаемых на снимке более высокого разрешения и не отображающихся на снимке более низкого разрешения. 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.

Результаты и обсуждение

На первоначальном этапе исследования на основе интеграции разнородной пространственно-распределенной информации средствами ГИС создана основа для крупномасштабной основы ландшафтной карты бассейна р. Касмала. В таблице 1 отражены основные морфометрические

показатели поверхности модельного бассейна. Показательно, что большая часть территории бассейна р. Касмала характеризуется как плоская поверхность, т.е. имеет углы наклона менее 1°.

Таблица 1

Соотношение площадей участков бассейна р. Касмала с различными морфометрическими показателями

Абсолютная высота, м (I) и доля от общей площади бассейна, % (II)													
I	<170	170-180	180-190	190-200	200-210	210-220	220-230	230-240	240-250	250-260	260-270	270-280	>280
II	0,1	0,7	2,5	5,3	9,0	11,4	15,0	16,6	13,3	12,9	8,3	4,3	0,6
Углы наклона, градусы (I) и доля от общей площади бассейна, % (II)													
I	0-1			1-3			3-5			5-90			
II	78,7			18,0			1,7			1,5			
Экспозиции склонов (I) и доля от общей площади бассейна, % (II)													
I	С	С-В	В	Ю-В	Ю	Ю-З	З	С-З	нет (угол <1°)				
II	2,3	1,5	1,7	4,0	3,5	1,2	1,5	5,4	78,9				

При этом с гидрологических позиций теряется смысл в выделении в пределах увалов, разделяющих ложбины древнего стока на Приобском плато, вершинных и склоновых поверхностей, что было традиционным для предшествующих исследований. Такая ситуация объясняет практически полное отсутствие стока со значительной части бассейна в р. Касмала, что и было отмечено инструментальными наблюдениями и расчетами.

Итоговая базовая ландшафтная основа (рис. 4) содержит информацию: углы наклона поверхности (4 класса); экспозиции склонов (8 классов); поверхностные отложения (8 классов); наземные покровы (16 классов) [10].

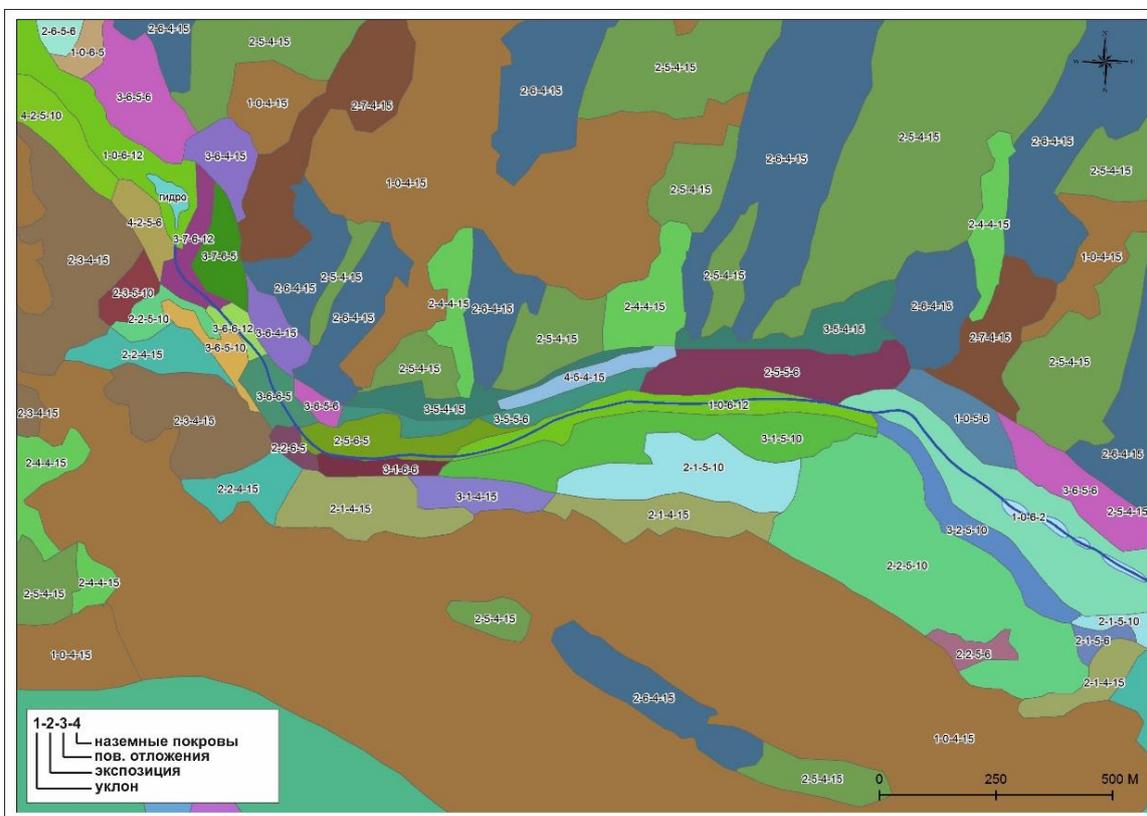


Рисунок 4. Фрагмент базовой ландшафтной основы бассейна р. Касмала

На последующем этапе исследования проанализирована пространственно-временная динамика ландшафтов бассейна р. Касмала.

В результате классификации разновременных данных получен ряд карт НП, соответствующих датам съемки (рис. 5-I) и проведен пространственно-временной анализ НП бассейна на уровне групп ландшафтов (рис. 7). По результатам анализа составляются матрицы переходов [14–16], которые описывает пространственную частоту переходов контуров разных выделов один в другой на снимках разных лет (рис. 6).

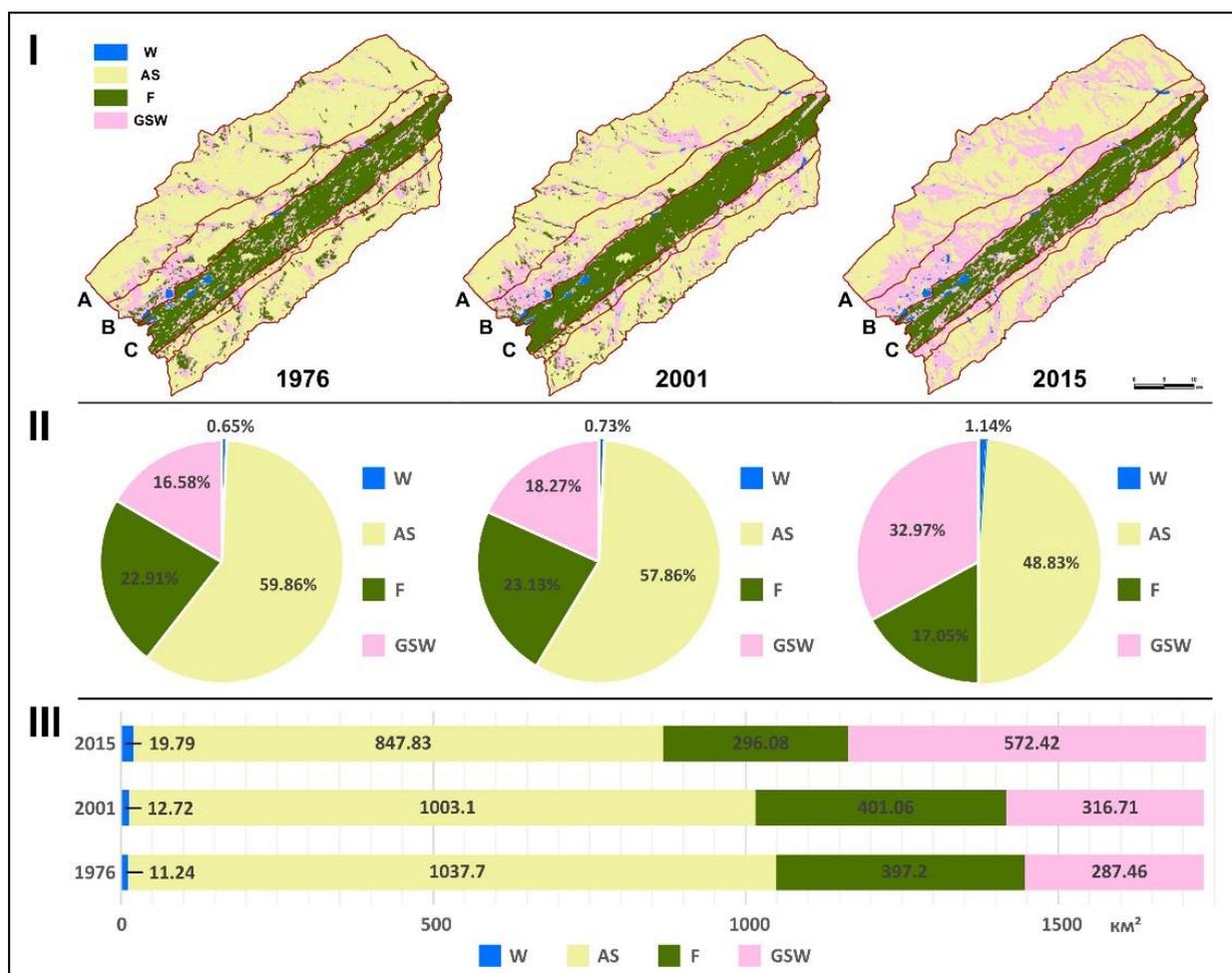


Рисунок 5. Пространственное распределение типов НП (I), соотношение типов НП (%) (II) и изменения их площадей (км²) (III); А, В, С – индекс группы ландшафтов (пояснения в тексте)

Проведены исследования по трем временным срезам: I – 1976 г., II – 2001 г., III – 2015 г. Рассмотрены четыре типа НП: водная поверхность озер и прудов (W – от англ. water body), сельскохозяйственные угодья (пахотные земли) и населенные пункты (AS – от англ. agriculture/settlement), леса сомкнутые (F – от англ. forest), естественные травяные сообщества – луга, степи, водно-болотные угодья (GSW – от англ. grassland, steppe, wetland). Полученные карты НП далее анализировались в программном комплексе QGIS Desktop 2.18, модуль MOLUSCE (Modules for Land Use Change Simulations). Данный модуль позволяет частично автоматизировать анализ динамики пространственной структуры по серии карт, либо космических снимков за различные периоды времени, на которых отображено текущее состояние территории [17].

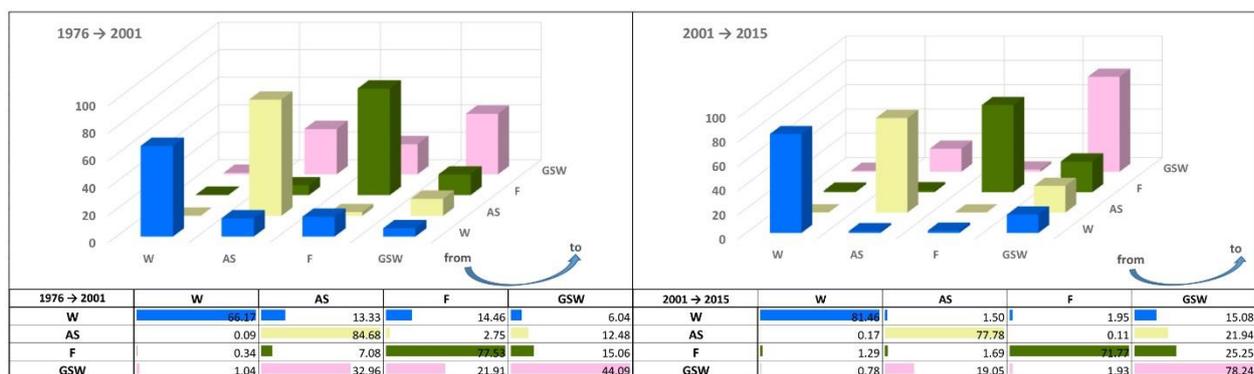


Рисунок 6. Матрицы изменений НП бассейна р. Касмала (в процентах от общей площади бассейна).

Для территории бассейна р. Касмала (подзона южной лесостепи) выделены группы ландшафтов [18]: зональные водораздельно-лесовые (А), интразональные галогидроморфные (В), экстразональные псаммоморфные (С) (рис. 5).

На исследуемой территории все типы НП относительно стабильны во времени. Однако наблюдается некоторые особенности. Выявлено постепенное снижение доли (11%²) пахотных угодий (AS), переходящей, главным образом, в залежи, вторичные степи и в меньшей степени в леса. Этот процесс происходит со времен освоения целинных и залежных земель 1954–1961 годов. В пределах зональных ландшафтов (А) сокращение составило 12% площади. Еще большее сокращение доли пашни (16%) характерно для интразональных ландшафтов (В). Для обеих групп ландшафтов характерно (рис. 6) резкое снижение площади в период 2001–2015 гг. (рис. 7) Распашка в пределах интразональных групп ландшафтов ограничена легким механическим составом почв (супеси, легкие суглинки и пески) и палеогидроморфизмом, с которым связано обилие засоленных участков неудобных для возделывания. Эти факторы способствовали активному переходу пашни в залежи и пастбища.

GSW представляют собой наиболее динамичный тип, увеличивший свою долю на 16%. Возможен их переход в пашни, зарастание лесом, либо затопление при разливе водоемов. Увеличение площади данного типа НП в целом пропорционально уменьшению площадей AS. Наибольшее увеличение доли GSW происходит в пределах интразональных ландшафтов (25%). Причинами увеличения доли данного типа НП стоит считать не только переходы пашни в залежь, но и вырубки леса, приводящие к его серьезной фрагментации.

Леса незначительно изменяли свои площади (до 6%) в масштабах всей площади бассейна Касмалы. Однако по отдельным группам ландшафтов этот процесс существенно отличался. В пределах групп ландшафтов А и В наблюдается направленное постепенное уменьшение доли лесов. Площадь колочных и балочных лесов здесь сократилась в 4–5 раз, переходы происходили по большей части в естественные травяные сообщества

Очень контрастной выглядит ситуация с лесами в пределах экстразональной (С) группы ландшафтов. Здесь наблюдается увеличение их доли на 8% в период 1976–2001 гг. Скорее всего это связано с зарастанием старых обширных сплошных вырубок, заброшенных населенных пунктов и образованием согр на переувлажненных территориях. В период 2001–2015 гг. отмечается резкое уменьшение лесных угодий (14%), что скорее всего вызвано новыми рубками либо пожарами, преимущественно вблизи крупных населенных пунктов.

Примечательна динамика водных объектов в пределах исследуемой территории бассейнов.

По исследованиям в бассейне р. Касмала [8] площадь прудов постепенно снижается со

² в процентах от площади водосборного бассейна, либо от рассматриваемой группы ландшафтов

времени их максимального развития в середине 1980-х годов. На территории Касмала, наряду с прудами, существуют также довольно крупные естественные озера. В настоящем исследовании по рассматриваемым трем временным срезам наблюдается постепенное увеличение доли площадей W от 0,65% в 1976г. до 1,14% в 2015 г. в основном за счет перехода в GSW. Тем не менее, эти изменения, вероятно, не являются направленными, а связаны с гидротермическими условиями конкретного года.

	1976 → 2001					Total 1976, км2	2001 → 2015					Total 2001, км2
	W	AS	F	GSW	Total 2001, км2		W	AS	F	GSW		
A	W	52.94	10.17	15.97	10.92	0.76	72.87	8.30	0.92	17.90	2.18	
	AS	0.04	88.72	1.85	9.39	800.94	0.44	83.67	0.17	15.73	785.43	
	F	0.88	36.37	9.96	52.79	45.22	2.70	14.23	7.42	75.65	33.7	
	GSW	0.75	42.75	10.47	46.04	136.29	0.89	24.62	0.88	73.60	161.92	
	Total 2001, км2	2.18	785.43	33.7	161.92		3.12	681.72	1.5	297.48		
B	W	71.71	16.36	6.42	5.50	4.19	82.37	2.12	0.35	15.16	5.44	
	AS	0.20	74.10	2.49	23.21	221.18	0.39	65.23	0.11	34.27	208.31	
	F	1.27	1.49	3.35	52.89	45.31	4.78	4.65	22.41	68.16	30.64	
	GSW	1.36	32.56	13.24	52.83	104.42	1.02	16.40	1.42	81.16	130.7	
	Total 2001, км2	5.44	208.31	30.64	130.7		8.12	159.23	9.02	199.8		
C	W	64.31	10.41	19.51	5.76	6.33	88.97	0.00	4.09	6.94	5.15	
	AS	0.97	29.45	51.84	17.74	15.8	2.41	44.16	7.18	46.25	9.77	
	F	0.12	0.64	95.35	3.90	306.28	1.02	0.33	83.26	15.38	336.24	
	GSW	1.21	5.38	74.52	18.90	46.66	1.36	6.87	15.12	76.65	23.92	
	Total 2001, км2	5.15	9.77	336.24	23.92		8.6	7.1	285.05	75.15		

Рисунок 7. Матрицы изменений бассейна р. Касмала по группам ландшафтов (изменения указаны в процентах от общей площади типа НП, А, В, С – индекс группы ландшафтов, Total – общая площадь типа НП в указанный временный срез.).

Заключение

Проведено крупномасштабное «синтетическое» ландшафтное картографирование репрезентативного для Алтайского края бассейна р. Касмала. Рассчитаны его основные морфометрические характеристики. Подготовлена базовая ландшафтная основа, которая наполняется значимой в гидрологическом отношении атрибутивной информацией, включающей: почвенно-гидрологические константы, данные по снегозапасам и полевой влагоемкости почв, результаты геофизических исследований по зондированию электрического сопротивления грунтов. В конечном итоге это позволит выделить основные группы ландшафтно-гидрологических комплексов и провести их классификацию.

Предложен и апробирован алгоритм количественного анализа ландшафтов, позволяющий определять тенденции пространственно-временных изменений их структуры в нескольких временных срезах. Изучена пространственно-временная динамика наземных покровов по основным группам ландшафтов.

Выявлены следующие особенности и закономерности:

- бассейн р. Касмала характеризуется сравнительно небольшой амплитудой изменений НП (до 14%).
- наиболее характерно снижение доли пахотных (доминирующих по площади) угодий (11%) и увеличение доли естественных травяных сообществ (16%);
- направления изменений и переходов различных типов НП может существенно отличаться для разных групп ландшафтов, наиболее динамичны интразональные галогидроморфные ландшафты (В) (изменения НП до 25%).

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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-35-00203 мол_а.

Литература

- [1] Efiog J, Digha ON Asouzuot OE (2016) Spatial Analysis of Land Surface-Vegetation Relationship in Mountainous Areas of the Tropics Using Srtm-3 Dem. *Journal of Geography and Geology*, vol. 8 (2), 59–75.
- [2] Fernandez-Landa A., Algeet-Abarquero N., Fernandez-Moya J., Guillen-Climent M.L., Pedroni L., Garcia F., Espejo A., Villegas, J.F.; Marchamalo, M.; Bonatti, J.; Escamochero, I.; Rodríguez-Noriega, P.; Papageorgiou, S.; Fernandes, E. An Operational Framework for Land Cover Classification in the Context of REDD+ Mechanisms. A Case Study from Costa Rica. *Remote Sens.* 2016, Vol. 8 (7), 593.
- [3] Hong, S., Jang, H., Kim, N., Sohn, H.-G. (2015). Water Area Extraction Using RADARSAT SAR Imagery Combined with Landsat Imagery and Terrain Information. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15 (3), 6652–6667.
- [4] Геоинформатика (2008). Под ред. В.С. Тикунова. Издательский центр «Академия», 1–384.
- [5] Виноградов Б.В. (1984) Аэрокосмический мониторинг экосистем. Изд-во Наука, 1–320.
- [6] Rafaela P, Leone A, Voccia L (2009) Land cover and land use change in the Italian central Apennines: a comparison of assessment methods. *Applied Geography*. Vol. 29 (1), 35–48.
- [7] Атлас Алтайского края (1978). ГУГК, Т. 1, 1–222.
- [8] Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Вагнер А.А. (2014) Антропогенные модификации и трансформации ландшафтов в бассейне р. Касмала: классификация и динамика на основе данных дистанционного зондирования. *Вестник алтайской науки*, № 1, 233–240.
- [9] Золотов Д.В., Черных Д.В. (2014) Репрезентативность модельного бассейна р. Касмалы для сравнительных ландшафтно-гидрологических исследований на Приобском плато. *Известия АлтГУ*, № 3 (1). 133–138.
- [10] Бирюков Р.Ю. (2013) Интеграция разнородной пространственно-распределенной информации средствами ГИС при создании основы для ландшафтно-гидрологических карт. *Мир науки, культуры, образования*. № 2, 307–314.
- [11] Бирюков Р.Ю. (2017) Анализ пространственно-временных изменений в структуре ландшафтов водосборных бассейнов Алтайского региона. Материалы XVII-й конференции молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку» (Барнаул, 7 февраля 2017 г.). Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 15–25.
- [12] USGS Global Visualization Viewer. Available on line: <http://glovis.usgs.gov/>
- [13] Xu H. (2006) Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 27 (14), 3025–3033.
- [14] Fan F., Weng Q., Wang Y. (2007) Land Use and Land Cover Change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, Based on Landsat TM /ETM+ Imagery. *Sensors*. Vol. 7 (7), 1323–1342.
- [15] Ramachandra T.V., Uttam K., Joshi N.V. (2012) Landscape Dynamics in Western Himalaya – Mandhala Watershed, Himachal Pradesh, India. *Asian Journal of Geoinformatics*. Vol. 12 (1).
- [16] Kindu M., Schneider T., Teketay D., Knoke T. (2013) Land use/land cover change analysis using object-based classification approach in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. *Remote Sensing*. Vol. 5 (5), 2411–2435.
- [17] MOLUSCE: QGIS Python Plugins Repository. Available on line: <http://plugins.qgis.org/plugins/molusce/>
- [18] Черных Д.В., Золотов Д.В. (2011) Пространственная организация ландшафтов бассейна реки Барнаулки. Изд-во СО РАН, 1–205.