

ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 914/919

DOI: 10.15372/GIPR20210119

Д.К. ГХОШ, Г.С. БХУНИЯ

Университет Seacom Skills University, 700084, Кендуа Мейн Роуд, 21, Калькутта, округ Бирбхум, штат Западная Бенгалия, Индия, debashis.net83.dg@gmail.com, rsgis6gouri@gmail.com

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕННОСТИ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ ПО ДАННЫМ
О ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ И ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ
В ПОДРАЗДЕЛЕНИИ БАРАСАТ САДАР (ЗАПАДНАЯ БЕНГАЛИЯ, ИНДИЯ)**

Представлен анализ отклика ценности экосистемных услуг на изменения в землепользовании и почвенно-растительном покрове (LULC), а также пространственного вклада отдельных трансформаций в функции экосистемных услуг на территории подразделения Барасат Садар (Западная Бенгалия, Индия) за период с 1977 по 2016 г. на основе модифицированного коэффициента. Для выявления пространственно-временных особенностей в LULC загружены изображения со спутников серии Landsat с интервалом в 10 лет. С целью определения характеристик LULC выполнена контролируемая классификация на основе классификатора, построенного по принципу максимального правдоподобия. Величины ценности экосистемных услуг рассчитаны погектарно для наземной экосистемы на основе коэффициента каждой характеристики почвенно-растительного покрова, использованного в предыдущих исследованиях. Максимальное значение ценности экосистемных услуг было зафиксировано для поверхностного водного объекта в 2016 г. (477,06 млн долл. США), а минимальное — для залежи (0,98 млн долл. США). Полученные результаты свидетельствуют о том, что ухудшение состояния сельскохозяйственных залежных земель, густая растительность, закустаренные земли, стремительное расширение пахотных угодий, а также искусственная инфраструктура для поверхностных водных объектов за период 1977–2016 гг. привели к постоянной потере общей ценности экосистемных услуг на сумму 238,92 млн долл. США при использовании в расчетах принятого коэффициента. Результаты исследования могут служить в качестве ориентира и основы при принятии решений, касающихся рационального использования земельных ресурсов, а также для достижения компромиссов между ростом городов и уменьшением экосистемных услуг.

Ключевые слова: экологические параметры, максимальное правдоподобие, мультиспектральные спутниковые данные, рациональное использование земельных ресурсов, урбанизация, расширение городских территорий.

D.K. GHOSH, G.S. BHUNIA

Seacom Skills University, 700084, Kendua Main Road, 21, Birbhum, West Bengal, India, debashis.net83.dg@gmail.com, rsgis6gouri@gmail.com

**EVALUATION OF ECOSYSTEM SERVICE VALUE
OF LAND USE/LAND COVER CHARACTERISTICS IN BARASAT SADAR SUB-DIVISION
(WEST BENGAL, INDIA)**

This paper presents an analysis of response of the ecosystem service value to land use/land cover (LULC) changes as well as of the spatial contribution from individual ecosystem service function changes of Barasat Sadar sub-division (West Bengal, India) during the period between 1977 and 2016 based on the modified coefficient. Landsat series satellite images were downloaded at about ten year's intervals to envision occurrences in spatio-temporal LULC patterns. A supervised classification was performed based on maximum likelihood (MXL) classifier to identify the LULC characteristics. Ecosystem serviced value were calculated per hectares of the terrestrial ecosystem based on the coefficient of each land cover characteristics used in earlier research. The highest value of ecosystem service value was recorded for a surface waterbody in 2016 (\$477.06 million) and the lowest value was estimated at \$0.98 million for fallow land. Our results suggest that deterioration in agricultural fallow, dense vegetation, scrub land and rapid expansion of crop land, and surface waterbody artificial infrastructure for the period of 1977–

2016 led to an incessant loss of the total ecosystem service value to the tune of \$238.92 million using the coefficient adopted in calculations. The outcome of the investigation can serve as a reference and basis for enlightening decision building concerning the management of land resources and subsidize to a trade-off between urban growth and the lessening in ecosystem services.

Keywords: ecological parameters, maximum likelihood, multispectral satellite data, land management, urbanization, urban expansion.

ВВЕДЕНИЕ

Получение информации об изменениях в землепользовании и почвенно-растительном покрове (Landuse/landcover, LULC), возможно, представляет собой наилучшую практику оценки проявления экологической модификации в пространственном и последовательном масштабе на глобальном уровне [1]. Видоизменение земной поверхности включает трансформацию почвенно-растительного покрова в ходе таких процессов, как рост городов, земледелие, обезлесение и т. п. [2]. Обусловленные землепользованием модификации в основном являются результатом этой трансформации. Эти преобразования в структурах LULC оказывают существенное влияние на агробиоразнообразие, деградацию почвы и устойчивость продукции растениеводства [3]. В доисторический период изменения в землепользовании и почвенно-растительном покрове имели как прямое, так и косвенное значение для деятельности человека при защите особо важных владений. В настоящее время промышленное развитие усилило концентрацию городских жителей в зонах крупных городов и переселение жителей из сельских районов, что сопровождается ростом производства продуктов питания на большей части сельскохозяйственных земель и отказом от использования малопродуктивных угодий [4]. Всевозрастающее загрязнение атмосферного воздуха, почв и вод — это следствие выявленных LULC. На фоне растущего беспокойства относительно сельскохозяйственного производства сельхозугодья увеличиваются за счет лесонасаждений, поверхностных водных объектов и залежных земель [5]. Авторы [6, 7] также высказывали предположение, что LULC ответственны за эмиссии парниковых газов в атмосферу в результате нарушения почвенно-растительного покрова. Основные изменения обусловлены ростом содержания углекислого газа в атмосфере в результате обезлесения и последующего земледелия на месте лесов, что способствует выделению почвенного углерода. Более того, выделение пасущимся крупным рогатым скотом метана и закиси азота, использование неорганических удобрений, дренаж водно-болотных угодий и ирригация оказывают прямое и косвенное влияние на изменение климата.

LULC сопровождаются негативным влиянием на экологические параметры на всех пространственных уровнях. Так, меняющаяся структура землепользования и почвенно-растительного покрова провоцирует экономические проблемы и социальные беспорядки. Модификация LULC может свидетельствовать о существенных экологических проблемах, таких как деградация и ухудшение качества почв, загрязнение вод и сокращение биоразнообразия и т. п. [8]. Следовательно, трансформация LULC воздействует на ценность экосистемных услуг (ESV), которая влияет на способность биосистемы удовлетворять человеческие нужды, а также на экологическое загрязнение. В работе [9] сообщалось, что изменения в LULC оказывают влияние на способность биосистемы удовлетворять человеческие потребности, а также способствуют ухудшению качества среды обитания. В работе [10] также сделан вывод о том, что преобразование 1 % земель в Китае в среднем привело к изменению в ESV на 0,10 % в период между 2000 и 2008 гг. Мультиспектральные спутниковые данные широко используются в различных научных исследованиях для определения изменений в LULC и уровней деградации природных ресурсов. Однако пространственные представления «драйверов» LULC и их воздействий могут быть использованы для выявления причинно-следственных связей в LULC, обнаруженных в прошлом, причем это также чрезвычайно удобные инструменты для управляющих земельными ресурсами и представителей правительственных структур, формулирующих стратегию землепользования. Связь между преобразованием LULC и его соответствующими аспектами представляется комплексной и существенной [11]. Как природные, так и социально-экономические факторы оказывают влияние на характеристики LULC [12].

Метод оценки ESV также может быть использован с привлечением стоимостной оценки, подхода выявленного предпочтения и метода переноса выгоды [13]. Согласно [14], в отношении населения в районе исследования имеют место негативное изменение незастроенной зоны и положительное — залежных земель и застроенных территорий. Ранее утверждалось, что произошли коренные изменения в землепользовании по причине стремительной урбанизации. Сельскохозяйственные и залежные земли, а также территории, занятые растительностью, используются для застройки, а также в коммерческих целях в связи с быстрым ростом населения. Они планомерно приобретались и осваи-

вались для сооружения жилья и промышленных объектов, а также для развития инфраструктуры [15]. Однако до настоящего времени выполнено очень мало исследований по количественному анализу воздействия изменений в LULC на ESV и пространственно-временной изменчивости, причем недостаточно исследованы пространственно-временная вариабельность и региональные изменения ESV. В настоящей работе представлен анализ количественного значения ESV как отклика на изменения в LULC с использованием значения модифицированных региональных коэффициентов и пространственного вклада изменений отдельных функций экосистемных услуг в подразделении Барасат Садар (Западная Бенгалия) за период 1977–2016 гг.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Подразделение Барасат Садар (рис. 1) расположено в западной части округа Северные 24 Парганы в Западной Бенгалии. Его площадь составляет 1002,48 км². В районе исследования муссоны доминируют в период с середины июня до середины октября. Среднее годовое количество осадков составляет 1800 мм, а относительная влажность — 71 %. Температура в регионе варьирует от 9 до 40 °С. Разновидность почв по гранулометрическому составу варьирует от песчаной до глинистой супесчаной;

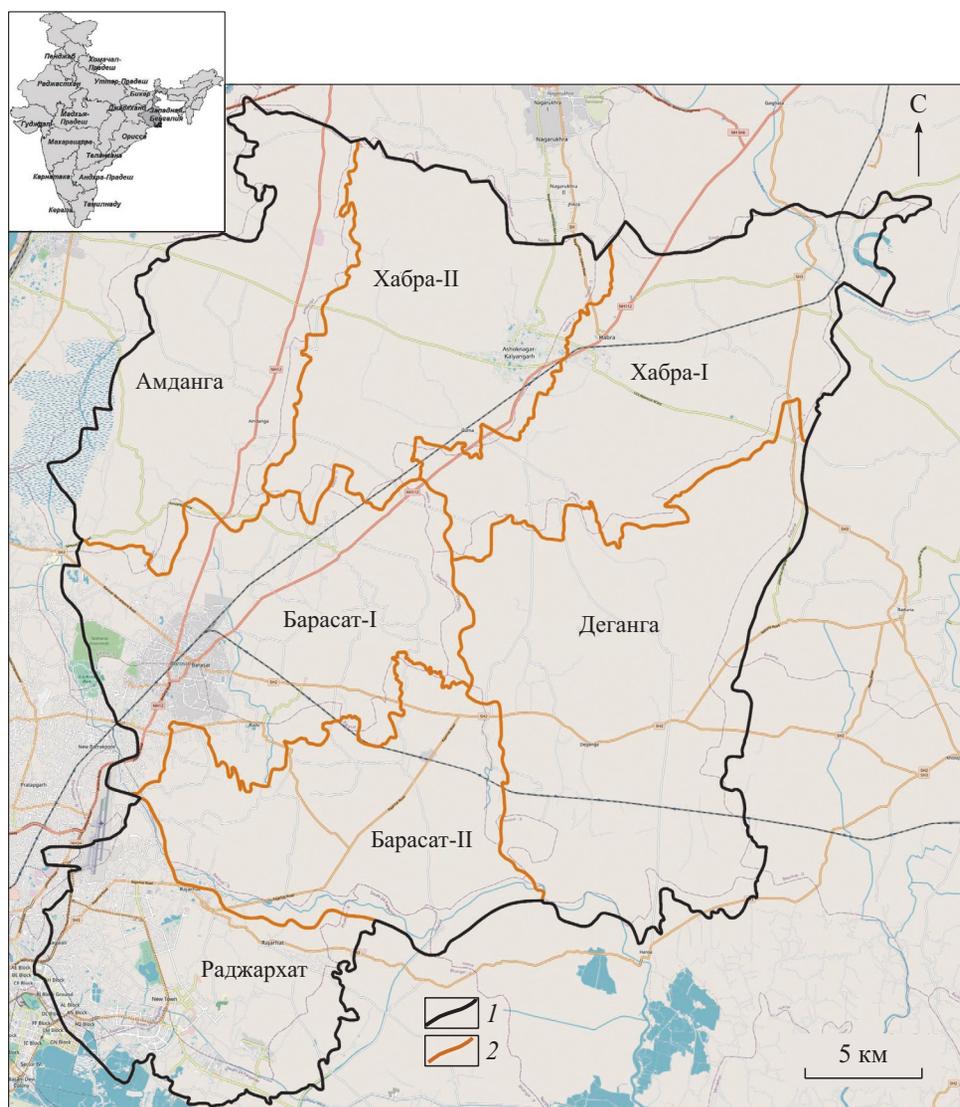


Рис. 1. Обзорная карта подразделения Барасат Садар.
Границы: 1 — блоков, 2 — района исследования.

рельеф области в основном равнинный. Самая длинная река подразделения Барасат Садар — р. Ич-хамати. В растительном покрове обнаружено большое количество макрофитов родов пистия (*Pistia*), вольфия (*Wolffia*), ряска (*Lemna*), азолла (*Azolla*), папоротник цератоптерис (*Ceratopteris*), пузырчатка (*Utricularia*), сальвиния (*Salvinia*) и эйхорния (*Eichhornia*), а также некоторое количество гидрофитов родов нимфоидис (*Nymphoides*), рдест (*Potamogeton*), апоногетон (*Aponogeton*), рогульник (*Trapa*), кувшинка (*Nymphaea*), лотос (*Nelumbo*). На некоторых участках также произрастают виды рода рогоз (*Typha*).

Население в основном обеспечивает себя продуктами питания за счет сельского хозяйства; имеется небольшое количество малых сельхозпредприятий. Согласно переписи населения Индии, проходившей в 2011 г. [16], плотность населения, проживающего в районе исследования, оценивается в 11 466 чел./км²; уровень грамотности составляет 84,9 %. При этом в данном подразделении 54,67 % городского населения и 45,33 % сельского. В регионе проживает 65,18 % индуистов и 34,26 % мусульман. Для сельского хозяйства характерна сбалансированная система земледелия, а также садоводство и рыбоводство. Хлопководство — основная отрасль промышленности в подразделении, а город представляет собой центр торговли рисом, овощами, сахарным тростником, картофелем и кокосами. Доля экономически активного населения в 2011 г. составляла 30,5 % [16]. Задействование рабочей силы в несельскохозяйственных секторах возрастает с 1971 г. Земля, бесспорно, является самым дорогим компонентом инфраструктуры, необходимым для планирования промышленного объекта. В результате чрезмерного использования подземных вод в нескольких блоках (см. рис. 1) в жилых районах наблюдается загрязнение мышьяком. Ввиду сокращения числа рабочих мест в сельской местности, а также регулярно происходящих там опасных природных явлений, таких как засухи и наводнения, и изменений цен на сельхозпродукцию в аграрных сегментах, городские центры в подразделении Барасат Садар служат в качестве «магнита» для привлечения сельских жителей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Получение спутниковых данных и классификация спутниковых изображений. Космические снимки со спутников серии Landsat были получены из системы бесплатного доступа к дистанционной информации Global Land Cover Facility (GLCF) в коллекции USGS (Геологическая служба США) на сайте Glovis [18]. Пять изображений со спутников серии Landsat были загружены с интервалом примерно в 10 лет для выявления пространственно-временных особенностей в LULC. В настоящей работе использовались данные с Landsat Multispectral Scanner (MSS) 1977 г. (60 × 60 м), Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) 1990 и 2001 гг. (30 × 30 м), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) 2010 г. (30 × 30 м) и Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) 2016 г. (30 × 30 м). Следовательно, классификация с обучением выполнялась с использованием эталонных участков, полученных по данным подспутниковых наблюдений, в сочетании со спектральной характеристикой композитных изображений в основных цветах (FCC) по классификатору максимального правдоподобия (MXL) [18]. Исследования изменений позволяют определить различия в изображениях одного и того же участка на разных исторических этапах. Анализ LULC выполнен для изображений за периоды 1977–1990, 1990–2001, 2001–2010 и 2010–2016 гг. при определении инструмента выявления изменений в LULC в ERDAS Imagine v 9.0.

Классификация данных о землепользовании и почвенно-растительном покрове. Визуальная интерпретация использовалась для определения класса LULC конкретного пикселя; при этом необходимое количество эталонных участков было задано для каждого изображения для различных типов LULC, основные из которых, учтенные в классификации, представлены в табл. 1. В основе определения

Таблица 1

Различные типы почвенно-растительного покрова и ESV [20]

Типы почвенно-растительного покрова	Эквивалентный биом	Коэффициент ESV, долл. США/(км-год)
Густая растительность	Лес	2168,84
Пахотные земли	Обрабатываемая/пахотная земля	699,37
Реки/озера	Реки/водоемы	6552,97
Залежи/пустоши	Песчаная/сухая залежь	59,83
Кустарниковая растительность	Сельскохозяйственная залежь	1089,19
Кустарниковая (скраб) растительность	Пастбище	565,88
Застроенная территория	Застроенная территория/поселение/городская территория	0

класса LULC лежал количественный метод с обязательной принудительной сортировкой временных рядов изображений для одного и того же географического положения с предварительным сравнением соответствующих пикселей для нахождения и количественной оценки участка изменений [18]. Для подразделения спутниковых изображений выполнены натурные наблюдения для получения контрольных данных с целью верификации типов LULC. Эталонные участки сформированы по подспутниковым данным, полученным для определения сигнатуры для каждого типа почвенно-растительного покрова. Классификация с обучением выполнена с использованием эталонных участков, определенных с помощью подспутниковых данных в сочетании со спектральной характеристикой (сигнатурой) в композитных изображениях в условных цветах (FCC) на основе параметрического правила байесовского алгоритма (классификатор максимального правдоподобия) [18]:

$$D = I_n(a_c) - [0,5I_n(ICov_cI)] - [0,5(X - M_c)^T (Cov_c^{-1})(X - M_c)],$$

где D — взвешенное расстояние (вероятность); C — конкретный класс; X — вектор измерения выбранного пикселя; M_c — средний вектор выборки класса C ; a_p — вероятность в процентах того, что любой выбранный пиксель входит в состав класса C ; Cov_c — ковариационная матрица пикселей в выборке класса C ; $ICov_cI$ — определитель Cov_c (матричная алгебра); Cov_c^{-1} — обратная Cov_c (матричная алгебра); I_n — функция натурального логарифма; T — функция транспонирования (матричная алгебра).

Определение ценности экосистемных услуг. В настоящей статье для оценки значений ценности экосистемных услуг (ESV) использованы показатели ценности глобальных экосистемных услуг, вычисленные в работах [12, 19, 20]. В них получены оценки ESV на единицу площади для различных характеристик почвенно-растительного покрова на Тибетском нагорье с помощью таблицы оценки потребления экологических благ с соответствующей стоимостью биомассы. В [21] использованы ESV из работы [20] для бассейна р. Коши, прилегающему к восточной части бассейна р. Гандак (GRB). При оценке величины экосистемных услуг погектарно нами также использован метод из [20] (см. табл. 1).

Для анализа общей экосистемной ценности по каждому конкретному виду землепользования площадь территории с определенным типом земельного покрова умножалась на значение коэффициента с помощью следующего уравнения:

$$ESV = \sum(A_k \cdot VC_k),$$

где ESV — ценность экосистемных услуг; A_k — площадь (в га); VC_k — значение коэффициента (долл. США/(км·год)) категории землепользования « k ».

Скорость изменения ценности экосистемы за период исследования определялась с помощью следующей формулы:

$$ESV_{cr} = \frac{ESV_{\text{текущий год}} - ESV_{\text{начальный год}}}{ESV_{\text{начальный год}}} \cdot 100 \%,$$

где ESV_{cr} — скорость изменения предыдущего года до окончательного года; $ESV_{\text{начальный год}}$ относится к суммарному ESV за 1977 г. в подразделении Барасат Садар; $ESV_{\text{текущий год}}$ относится к суммарному ESV за 1990 г. в подразделении Барасат Садар.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нами составлена карта LULC в подразделении Барасат Садар для пяти контрольных лет (1977, 1990, 2001, 2010 и 2016 гг.). Полученная статистика показана на рис. 2 и в табл. 2. Согласно результатам исследования, на долю сельскохозяйственных земель (сельскохозяйственные залежи + пахотные угодья) — основных типов землепользования — приходится более 50 % в период 1977–2010 гг. и более 30 % в период 2010–2016 гг. В районе исследования наблюдается постоянный рост осваиваемой территории, сельских поселений с синантропной растительностью и поверхностных вод. Сухие залежные земли и пустоши занимают весьма незначительную часть территории подразделения — <2 %. Доля общей площади освоенных территорий увеличилась от 0,95 % в 1977 г. до 13,04 % в 2016 г.; доля сельских поселений с синантропной растительностью также возросла: с 7,35 % в 1977 г. до 35,21 % в 2016 г. В районе исследования также выращивают сельскохозяйственные культуры, такие как нефелиум, манго, бананы, гуаву. В период 1977–2016 гг. площадь сельскохозяйственных залежных земель уменьшилась примерно на 32,82 %.

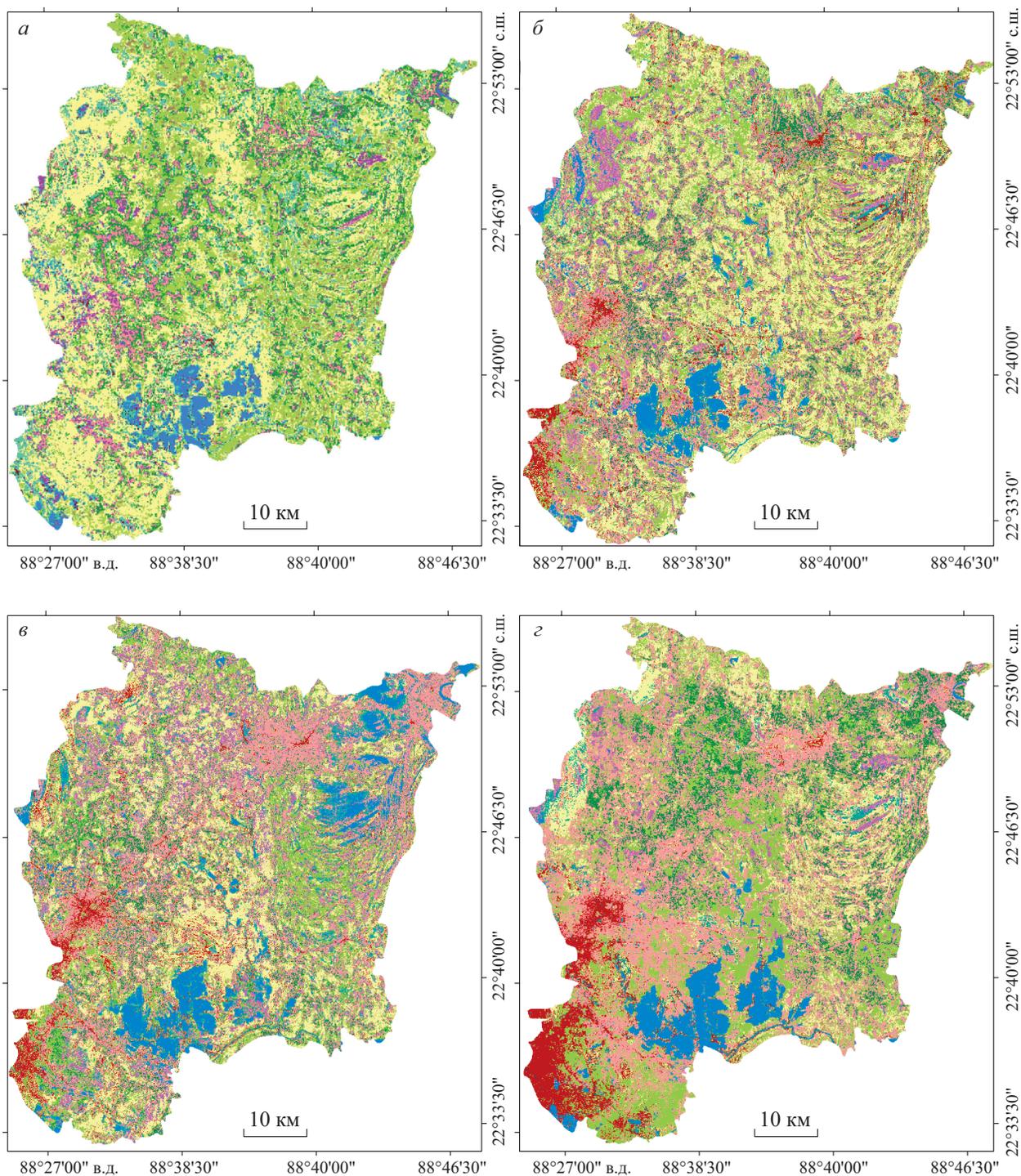


Рис. 2 (начало). Карты землепользования и почвенно-растительного покрова за 1977 (а), 1990 (б), 2001 (в), 2010 (г) и 2016 (д) гг.

Виды землепользования и почвенно-растительного покрова (LULC): 1 — поверхностные воды, 2 — городские поселения, 3 — сельские поселения с синантропной растительностью, 4 — заболоченная местность, 5 — влажные залежи, 6 — сухие залежи, 7 — пахотные земли, 8 — сельскохозяйственные залежи, 9 — густая растительность.

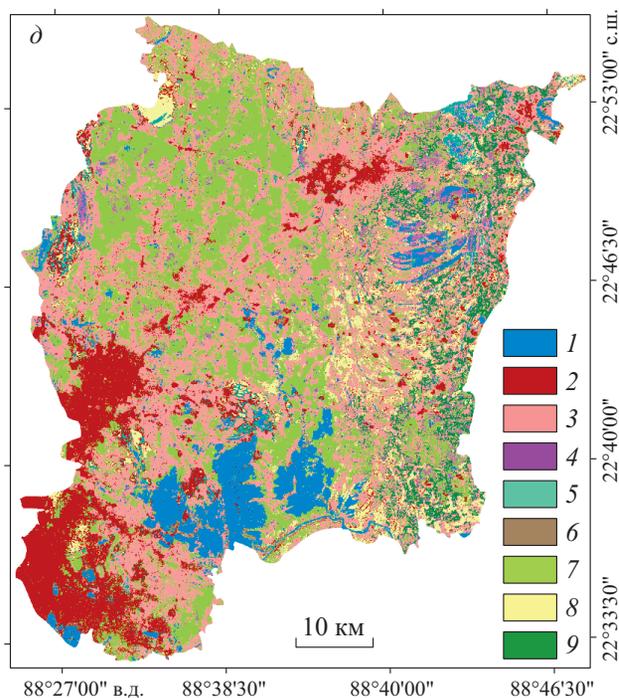


Рис. 2 (окончание).

Что касается густой кустарниковой растительности, то в рассматриваемый период 1977–2016 гг. наблюдалось постепенное сокращение ее ареала распространения. В 1977 г. она составляла 35,27 км², т. е. 3,47 % площади, а в 2016 г. уменьшилась до 27,11 км² (2,66 %). Сухие залежные земли и пустоши занимали 18,33 км², 7,29, 7,60, 12,72 и 16,31 км² территории в 1977, 1990, 2000, 2010 и 2016 гг. соответственно. Разреженная кустарниковая растительность была распространена на 85,33 км² (8,38 %), 41,75 (4,1), 32,01 (3,15), 28,42 (2,79) и 18,48 км² (1,82 %) в 1977, 1990, 2000, 2010 и 2016 гг. соответственно. Площадь, занимаемая густыми лесами в подразделении Барасат Садар, постепенно уменьшалась: с 14,44 % (146,97 км²) в 1977 г. до 8,88 % (90,35 км²) в 1990 г., до 6,14 % (62,50 км²) в 2000 г., до 5,88 % (59,80 км²) в 2010 г. и до 4,13 % (42,01 км²) в 2016 г. Динамический индекс поверхностных вод за период 1977–2016 гг. значительно изменился: если в 1977 г. на его долю приходилось 2,38 % (24,17 км²), то в 1990 г. он уменьшился до 3,74 % (38,02 км²). В 2016 г. он увеличился от 3,98 % (40,48 км²) до 7,15 % (72,80 км²) (см. табл. 2).

С использованием значений для экосистемных услуг из работы [20] определено значение ESV для подразделения Барасат Садар за период 1977–2016 гг. (табл. 3). Ценность экосистемных услуг (ESV) для плотной растительности, сельскохозяйственных залежей, пахотных угодий, поверхностных вод и кустарниковой растительности была рассчитана на единицу площади. В целом суммарная ценность ESV для всего подразделения Барасат Садар составила примерно 1096,49, 978,64, 926,41, 878,47, 857,57 млн долл. США в 1977, 1990, 2000, 2010 и 2016 гг. соответственно. Таким образом, ценность ESV в подразделении Барасат Садар уменьшилась на 350,77 долл. США и составляет 18,86 % от совокупной ценности ESV в 1977 г. Ценность экосистемных услуг каждого типа LULC разная по всему подразделению для различных контрольных лет (1977, 1990, 2000, 2010 и 2016 гг.), однако значения показывают сильную корреляцию ($R^2 = 0,92$). В 1977 г. максимальная ценность экосистемы была рассчитана для сельскохозяйственных залежей (439,79 млн долл. США), за ней идут густые леса (318,75 млн долл. США), поверхностные воды (158,39 млн долл. США) и пахотные земли

Таблица 2

Площадь (S) (км²/%), занимаемая типом LULC в подразделении Барасат Садар в 1977, 1990, 2001, 2010 и 2016 гг.

Класс LULC	Годы									
	1977		1990		2000		2010		2016	
	S	%	S	%	S	%	S	%	S	%
Освоенная территория	9,71	0,95	18,41	1,81	58,32	5,73	76,31	7,5	132,72	13,04
Поверхностные воды	24,17	2,38	38,02	3,74	40,48	3,98	59,49	5,85	72,8	7,15
Сельские поселения с синантропной растительностью	74,81	7,35	218,63	21,48	220,25	21,64	341,48	33,55	358,29	35,21
Густая кустарниковая растительность	35,27	3,47	76,45	7,51	63,46	6,24	39,37	3,87	27,11	2,66
Сухие залежи/пустоши	18,33	1,8	7,29	0,72	7,60	0,75	12,72	1,25	16,31	1,6
Пахотные земли	219,33	21,55	221,74	21,79	239,4	23,52	260,63	25,61	280,17	27,53
Разреженная кустарниковая растительность	85,33	8,38	41,75	4,1	32,01	3,15	28,42	2,79	18,48	1,82
Сельскохозяйственные залежи	403,78	39,68	305,06	29,98	293,69	28,86	139,48	13,71	69,81	6,86
Густая растительность	146,97	14,44	90,35	8,88	62,50	6,14	59,80	5,88	42,01	4,13
Итого	1017,7	100	1017,7	100	1017,7	100	1017,7	100,0	1017,7	100

ESV для различных типов почвенно-растительного покрова за период 1977–2016 гг.

Тип землепользования	Год				
	1977	1990	2000	2010	2016
	ESV, долл. США/(км-год)				
Водоёмы	158,39	249,14	265,26	389,84	477,06
Густая кустарниковая растительность	19,96	43,26	35,91	22,28	15,34
Залежи/пустоши	1,10	0,44	0,45	0,76	0,98
Пахотные земли	153,39	155,08	167,43	182,28	195,94
Разреженная кустарниковая растительность	5,11	2,50	1,92	1,70	1,11
Сельскохозяйственные залежи	439,79	332,27	319,88	151,92	76,04
Густая растительность	318,75	195,95	135,55	129,70	91,11

(153,39 млн долл. США). Минимальная ценность ESV рассчитана для залежных земель (1,1 млн долл. США), за ними идут закустаренные земли. В 1990 г. максимальная ценность ESV была рассчитана для сельскохозяйственных залежей (332,27 млн долл. США), за ними следуют поверхностные воды (249,14 млн долл. США) и густая растительность (195,95 млн долл. США). Минимальная ценность ESV в 1990 г. определена для залежей (0,44 млн долл. США), за ними идет разреженная кустарниковая растительность (2,5 млн долл. США). В 2000 г. максимальная ESV зарегистрирована для сельскохозяйственных залежей, за ними следуют поверхностные воды и пахотные земли. Минимальная ценность ESV получена для залежей и кустарниковой растительности. В 2010 г. максимальная ценность ESV определена для поверхностных вод (389,84 млн долл. США), за ними следуют пахотные земли (182,28 млн долл. США), сельскохозяйственные залежи (151,92 млн долл. США) и густая растительность (129,7 млн долл. США). В 2016 г. максимальная ценность ESV рассчитана для поверхностных вод (477,06 млн долл. США), за ними следуют пахотные земли (195,94 млн долл. США). Минимальная ценность ESV зафиксирована для залежей, за ними следуют кустарниковая и густая кустарниковая растительность. В результате анализа выявлена сильная корреляция между ESV в различные интервалы времени, а именно для поверхностных вод ($R^2 = 0,96$), пахотных земель ($R^2 = 0,95$), разреженной кустарниковой растительности ($R^2 = 0,80$), сельскохозяйственных залежей ($R^2 = 0,95$) и густой растительности ($R^2 = 0,86$), за исключением густой кустарниковой растительности ($R^2 = 0,17$) и пустошей ($R^2 = 0,001$).

Изменения в ESV свидетельствуют о четко выраженном уменьшении в течение первого (1977–1990 гг.), второго (1990–2000 гг.), третьего (2000–2010 гг.), четвертого (2010–2016 гг.) и всего (1977–2016 гг.) периодов. Сокращение общей ценности ESV за первый рассматриваемый период составило примерно 117,85 млн долл. США, что соответствует скорости изменения, равной 10,74 %. Вся ценность ESV стремительно уменьшалась примерно на 52,23 млн долл. США (5,33 %), 47,94 (5,17) и 20,9 млн долл. США (2,38 %) от общей ценности ESV за периоды 1990–2000, 2000–2010 и 2010–2016 гг. на фоне второго, третьего и четвертого периодов соответственно.

В табл. 4 приводятся различные величины ценности экосистемных услуг всех типов LULC для всего ландшафта подразделения для разных контрольных лет. В целом утрата ценности ESV для района исследований Садар рассчитана в размере 238,92 млн долл. США при скорости изменения, равной 21,79 % за период 1977–2016 гг. Максимальная отрицательная скорость изменения характерна для сельскохозяйственных залежей и густой растительности и составляет 363,76 и 227,64 млн долл. США при скорости изменения, равной 422,50 и 290,15 % соответственно. Таким образом, выявлено увеличение ценности ESV для поверхностных вод и пахотных земель в размере 318,67 и 42,55 млн долл. США при скорости изменения, равной 142,82 и 25,65 % соответственно. В результате анализа также была выявлена значительная связь со скоростью изменения переменных LULC за весь рассматриваемый период. Рассчитанные значения R^2 для поверхностных вод, густой кустарниковой растительности, сухих залежей/пустошей, пахотных земель, разреженной кустарниковой растительности и густой растительности составили 0,83, 0,56, 0,62, 0,72, 0,25, 0,79 и 0,80 соответственно.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что поверхностные воды (90,76 млн долл. США), густая кустарниковая растительность (23,30 млн долл. США) и пахотные земли обнаруживают положительное изменение за период 1977–1990 гг. Более того, отрицательные изменения категорий LULC наблюдались в случае с сухими залежами, разреженной кустарниковой растительностью, сельскохозяйственными залежами и густой растительностью. Максимальное отрицательное изменение было отмечено для густой растительности (122,80 млн долл. США), за ней следуют сельскохозяйствен-

Таблица 4

Оценка изменений экосистемы (долл. США) и скорости изменений характеристик землепользования и почвенно-растительного покрова (%) в подразделении Барасат Садар за различные интервалы времени (1977–2016 гг.)

Типы землепользования и почвенно-растительного покрова	1977–1990 гг.		1990–2000 гг.		2000–2010 гг.		2010–2016 гг.		1977–2016 гг.	
	изменение	скорость изменения								
Водоёмы	-90,76	+1,08	-16,12	+142,67	-124,57	+118,30	-87,22	+267,46	-318,67	+142,81
Густая кустарниковая растительность	-23,30	+196,80	+7,35	+39,75	+13,63	+26,13	+6,94	+46,58	4,62	+56,91
Сухие залежи/пустоши	+0,66	+38,67	-0,02	+103,82	-0,31	+166,91	-0,21	+127,46	0,12	+87,88
Пахотные земли	-1,69	+52,29	-12,35	+47,11	-14,85	+58,56	-13,67	+74,78	-42,55	+25,65
Разреженная кустарниковая растительность	+2,61	+43,82	+0,58	+74,17	+0,21	+86,87	+0,59	-63,32	4,00	+16,55
Сельскохозяйственные залежи	+107,52	+364,24	+12,38	+236,00	+167,96	+272,39	+75,88	+101,87	363,76	+422,50
Густая растительность	+122,80	+257,28	+60,40	+126,78	+5,86	+39,87	+38,58	+59,45	227,64	+290,17

Примечание. «-» означает положительное изменение, «+» – отрицательное изменение.

ные залежи 107,52 млн долл. США). Максимальная скорость изменений категорий LULC определена для сельскохозяйственных залежей (364,24 млн долл. США), густой растительности (257,28 млн долл. США) и густой кустарниковой растительности (196,80 млн долл. США).

В подразделении Барасат Садар изменялась ценность ESV каждой категории LULC с заметным уменьшением ESV сельскохозяйственных залежей, густой растительности и густой кустарниковой растительности, равным 12,38, 60,40 и 7,35 млн долл. США, при скорости изменения, составляющей 236, 126,78 и 39,75 % соответственно (рис. 3). И, напротив, положительная величина ценности ESV

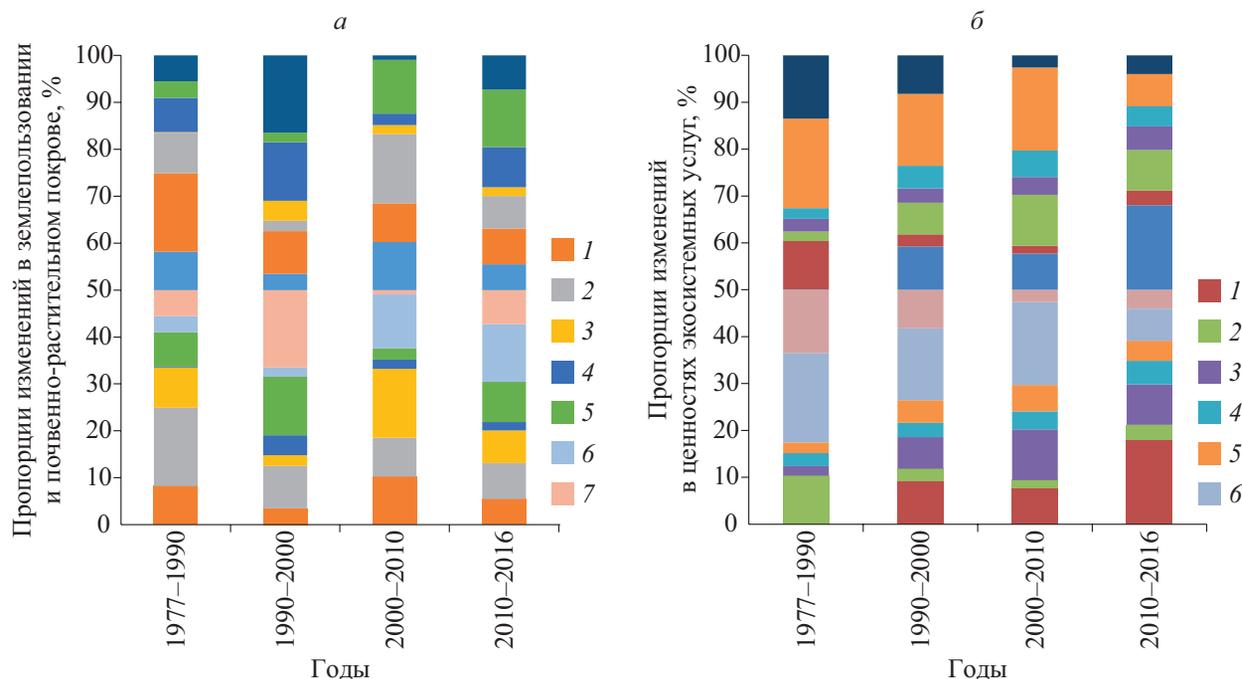


Рис. 3. Пропорции изменений в землепользовании и почвенно-растительном покрове (а) и в ценностях экосистемных услуг (б) за период 1977–2016 гг. в подразделении Барасат Садар.

1 – поверхностные воды; 2 – густой кустарник; 3 – сухие залежи/пустоши; 4 – сельскохозяйственные угодья; 5 – разреженный кустарник; 6 – сельскохозяйственные залежи; 7 – густая растительность.

рассчитана для поверхностных вод и пахотных земель при ее увеличении на 16,12 и 12,35 млн долл. США и при скорости изменения, равной 236 и 126,78 % соответственно. Для периода 2000–2010 гг. была рассчитана отрицательная скорость изменения, равная 26,13, 272,39 и 39,87 % для густой кустарниковой растительности, сельскохозяйственных залежей и густой растительности соответственно. Положительная скорость изменения для поверхностных вод и пахотных земель составила 87,22 и 12,78 % соответственно. Однако скорость изменения для разреженной кустарниковой растительности и залежей составила 0,21 и 0,31 млн долл. США соответственно. В 2010–2016 гг. утрата ценности ESV для густой кустарниковой растительности, сельскохозяйственных залежей, густой растительности была равна 75,88, 38,58 и 6,94 млн долл. США при скорости изменения, равной 101,87, 59,45 и 46,58 % соответственно. При этом увеличение ESV для пахотных земель и поверхностных вод составило 13,67 и 87,22 млн долл. США при скорости изменения, равной 74,78 и 267,46 % соответственно.

Изменения LULC в подразделении Барасат Садар обусловлены быстрой урбанизацией. Ее стремительные темпы сопровождались переселением большого количества населения из сельских районов в города, быстрым ростом индустрии недвижимости, развитием транспортной сети и другой городской инфраструктуры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что освоенная территория, поверхностные воды, сельские поселения с синантропной растительностью и пахотные земли увеличились за весь рассмотренный период. С другой стороны, уменьшилась площадь территорий, занятых кустарниковой растительностью (как густой, так и разреженной), сухими залежами и пустошами, сельскохозяйственными залежами и густой растительностью [22]. При этом быстрый рост городского населения также сопровождался увеличением потребностей в продуктах питания и других товарах, а также в жилье, питьевой воде и другой инфраструктуре [23]. В связи с этим был отклонен сценарий наблюдаемых пространственно-временных изменений в отношении закустаренных территорий ввиду роста потребности в освоении новых участков и в пахотных землях, а также по причине расширения сельских поселений. В результате анализа также выявлено, что увеличение освоенных территорий, сельских поселений с синантропной растительностью и пахотных угодий происходило в основном за счет сельскохозяйственных залежей, густых лесов и сухих залежей/пустошей.

За весь рассматриваемый период в районе исследований выявлена тенденция к увеличению площади водных объектов, что в конечном счете может привести к эрозии почв и утрате биоразнообразия на данной территории. Увеличение площади водоемов может быть связано с интенсификацией рыбопроизводной деятельности. В районе исследования возросла деятельность рыбопроизводных хозяйств, которые создаются из-за отсутствия возможности добычи рыбы в естественных условиях в связи с пересыханием русел рек, ручьев и искусственных водных каналов. В целом общее увеличение составило 136,01 км² за 40-летний период. Одновременно на 746,03 км² уменьшилась площадь растительного покрова. В результате этого сокращаются пахотные земли и увеличивается население.

Городская территория расширялась на юго-восток и на юг, а также в сторону небольших участков центральной части района исследования, а пахотные угодья — на северо-запад. Площадь водоемов увеличивалась на юго-востоке района. ESV природных ресурсов на региональном уровне важны не только для местных жителей, проживающих в центральных районах, но и для развития окраинных территорий (земледелие, рост городов, профессиональные, национальные и международные сообщества) [24]. Сокращающиеся ESV свидетельствуют об ухудшении экологической ситуации на конкретной территории [25]. Результаты исследования свидетельствуют о том, что всевозрастающий прессинг со стороны населения и урбанизация в рассматриваемом районе представляют собой основную причину существенной утраты ESV в ущерб густой растительности и сельскохозяйственным залежным землям. Несмотря на ряд исследований, выполненных в разных странах различными учеными и планировщиками землепользования [12, 26, 27], для района исследований отсутствуют соответствующие работы, посвященные экосистемным услугам.

Ущерб для ESV, причиной которого стало бездумное стремление к экономическому процветанию, — распространенное явление в Индии. Особенно это касается округа Северные 24 Парганы, где наблюдаются региональный рост и расширение городов. В ряде работ [28–31] отмечалось, что рост городских территорий, обезлесение в коммерческих целях, региональный рост и повсеместное увеличение рыбопроизводной деятельности в подразделении Барасат Садар являются всеобщей проблемой и оказывают огромное влияние на биоразнообразие и ландшафты. Урбанизация захватывает близлежащие возделываемые земли, густые леса и закустаренные территории, что сопровождается ущербом для всех ESV [32] и приводит к сокращению местных экосистемных услуг [33]. Необходимо организовать устойчивое рациональное использование LULC для улучшения их современного состояния и их услуг. Для этого, следовательно, необходимо крупномасштабное сохранение экологических ресурсов для их рациональной эксплуатации.

В отношении оценки ESV существует целый ряд неясностей и проблем. Разнородность и сложность взаимодействия человека и окружающей среды могут привести к неточностям в результате упрощения экосистемных услуг [10]. Несмотря на ряд имеющихся исследований, в которых обращается внимание на влияние точной оценки коэффициентов определения ESV, очень редко ставится вопрос о необходимости динамических исследований, в корне отличных от обобщенных, поскольку точность определения значения коэффициента искажает ESV в определенных точках в большей мере, нежели оценка меняющейся на обратную модификацию ESV за исторический период [34, 35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании подчеркивается существенная связь между изменениями в LULC и воздействием на функцию и конфигурацию экосистемных услуг за 41 год (1977–2016 гг.). Итоги работы могут служить в качестве ориентира и основы при принятии решений, касающихся рационального использования земельных ресурсов, а также для достижения компромиссов между ростом городов и уменьшением экосистемных услуг. Из изученных типов LULC воды в 2016 г. имели максимальную ценность ESV в размере 477,06 млн долл. США, а минимальная ценность ESV для залежных земель была рассчитана в размере 0,98 млн долл. США. Полученные результаты с использованием принятого коэффициента свидетельствуют о том, что деградация сельскохозяйственных залежей, густой растительности, закустаренных территорий, а также быстрое расширение пахотных земель и искусственной инфраструктуры для водоемов в период 1977–2016 гг. привели к неуклонной утрате всех экосистемных услуг ESV, эквивалентной 238,92 млн долл. США. Сокращение сельскохозяйственных залежных земель, которые стали использоваться в основном как обрабатываемые земли для постройки жилья во всем районе исследования, стало основной причиной существенного ущерба для ESV. Более того, согласно современной модели стремительного градостроительства, в случае с городами следует уменьшить интенсивное землепользование, а не жертвовать сельскохозяйственными залежными землями и территориями, покрытыми густой растительностью, для расширения городских территорий. Необходимо обязательное принятие мер с использованием детально проработанной альтернативной политики и перспективного планирования для улучшения экологического состояния и экологических услуг и снижения влияния антропогенной деятельности в районе исследования. Также рекомендуется выполнить анализ эластичности изменений экосистемных услуг на фоне изменений в LULC в подразделении Барасат Садар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roy P., Roy A. Land use and land cover change in India: A remote sensing & GIS perspective // *Journ. of the Indian Institute of Science.* — 2010. — N 90 (4). — P. 489–502.
2. Richards P., VanWey L. Where deforestation leads to urbanization: how resource extraction is leading to urban growth in the Brazilian Amazon // *Ann. Assoc. Am. Geogr.* — 2015. — N 105 (4). — P. 806–823.
3. Frison E.A., Cherfas J., Hodgkin T. Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security // *Sustainability.* — 2011. — N 3. — P. 238–253.
4. Langeweg F., Hilderink H., Mass R. Urbanization, industrialization and sustainable development [Электронный ресурс]. — <https://www.pbl.nl/sites/default-/files/cms/publicaties/402001015.pdf> (дата обращения 15.08.2019)
5. Carr D.L. Proximate population factors and deforestation in tropical agricultural frontiers // *Popul Environ.* — 2004. — N 25 (6). — P. 585–612.
6. Houghton R.A., House J.I., Pongratz J., van der Werf G.R., DeFries R.S., Hansen M.C., Le Quer C., Ramankutty N. Carbon emissions from land use and land-cover change // *Biogeosciences.* — 2012. — N 9. — P. 5125–5142.
7. Mucoz C., Paulino L., Monreal C., Zagal E. Greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions from soils: a review // *Chilean Journ. of Agricultural Research.* — 2010. — N 70 (3). — P. 485–497.
8. Matano A., Kanangire C., Anyona D., Abuom P., Gelder F., Dida G., Owuor P., Ofulla A. Effects of land use change on land degradation reflected by soil properties along Mara River, Kenya and Tanzania // *Open Journ. of Soil Science.* — 2015. — N 5. — P. 20–38.
9. Polasky S., Nelson E., Pennington D., Johnson K.A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of Minnesota // *Environ. Resour. Econ.* — 2011. — N 48. — P. 219–242.
10. Song W., Deng X. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China // *Sci. Total. Environ.* — 2017. — N 576. — P. 705–719.
11. Hassan Z., Shabbir R., Ahmad S.S., Malik A.H., Aziz N., Butt A., Erum S. Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: a case study of Islamabad Pakistan // *Springer Plus.* — 2016. — N 5 (812). — P. 1–12.

12. **Li Y., Zhan J., Liu Y., Zhang F., Zhang M.** Response of ecosystem services to land use and cover change: A case study in Chengdu City // *Resour. Conserv. Recy.* — 2018. — N 132. — P. 291–300.
13. **Arowolo A.O., Deng X., Olatunji O.A., Obayelu A.E.** Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria // *Sci. Total. Environ.* — 2018. — N 636. — P. 597–609.
14. **Basu T., Saha S.K.** The analysis of land use land cover changes using geoinformatics and its relation to changing population scenarios in Barasat Municipality in North Twenty Four Parganas, West Bengal // *Internat. Journ. of Humanities and Social Science Invention.* — 2017. — N 6 (8). — P. 1–13.
15. **Biswas A., Singh O.** Rajarhat new town an urban perspective: A case study of urbanization, West Bengal, India // *Internat. Journ. of New Technology and Research.* — 2017. — N 3 (5). — P. 29–44.
16. **Перепись населения Индии, 2011** [Электронный ресурс]. — <https://www.censusindia2011.com/> (дата обращения 15.08.2019).
17. **Система бесплатного доступа к дистанционной информации Global Land Cover Facility** [Электронный ресурс]. — <http://glovis.usgs.gov> (дата обращения 15.08.2019).
18. **Lillesand T.M., Kiefer R.W.** *Remote Sensing and Image Interpretation.* — New York: John Wiley and Sons, 1994. — 750 p.
19. **Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S.J., Kubiszewski I., Farber S., Turner R.K.** Changes in the global value of ecosystem services // *Glob. Environ. Chang.* — 2014. — N 26. — P. 152–158.
20. **Xie G., Lu C.X., Leng Y.F., Zheng D.U., Li S.C.** Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau // *Journ. of Natural Resources.* — 2003. — N 18. — P. 189–196.
21. **Zhao L., He L., Chen S., Zou L., Zhou K., Ao X., Liu S., Hu X., Han G.** Microbial BOD sensors based on Zr (IV)-loaded collagen fiber // *Enzyme Microb. Technol.* — 2017. — N 98. — P. 52–57.
22. **Mitra (Sinha) B., Pahari D.P.** Growth and pattern of urbanisation: An analysis of Barasat Subdivision, North 24 Parganas, West Bengal // *Journ. of Geography, Environment and Earth Science International.* — 2019. — N 21 (2). — P. 1–16.
23. **Mohammed A., Tassew N.** Land use/cover changes between 1966 and 1996 in Chirokella Micro-watershed, South-eastern Ethiopia // *East African Journ. of Sciences.* — 2009. — N 3 (1). — P. 1–8.
24. **Joshi L.** Protected areas and payment for ecosystem services: A feasibility study in Shivapuri-Nagarjun National Park, Nepal [Электронный ресурс]. — http://www.forestation.org/app/-webroot/js/tinymce/editor/plugins/filemanager/files/icimod-protected_areas_and_payment_for_ecosystem_services.pdf (дата обращения 15.08.2019).
25. **Rai R., Zhang Y., Paudel B., Acharya B.P., Basnet L.** Land use and land cover dynamics and assessing the ecosystem service values in the Trans-Boundary Gandaki River Basin, Central Himalayas // *Sustainability.* — 2008. — N 10. — P. 3052.
26. **Mamat A., Halik U., Rouzi A.** Variations of ecosystem service value in response to land-use change in the Kashgar Region, Northwest China // *Sustainability.* — 2018. — N 10. — P. 200.
27. **Reyers B., O'Farrell P.J., Cowling R.M., Ego B.N., Le Maitre D.C., Vlok J.H.J.** Ecosystem services, land-cover change, and stakeholders: finding a sustainable foothold for a semiarid biodiversity hotspot // *Ecology and Society.* — 2009. — N 14 (1). — P. 38.
28. **Banerjee S., De D.** Level of urbanization: An empirical study of North 24 Parganas // *International Research Journ. of Social Sciences.* — 2014. — N 3 (10). — P. 12–20.
29. **Paul S., Chatterjee K.** Urbanisation and consistency measurement: A study on district of North 24 Parganas, West Bengal, India // *Archives of Applied Science Research.* — 2012. — N 4 (5). — P. 2052–2067.
30. **State Forest Report 2011–2012** [Электронный ресурс]. — <http://westbengalforest.gov.in/> (дата обращения 15.08.2019).
31. **Sarbadhikary S.** Case study on the present status of beel fisheries in three districts of West Bengal with a suggestive note for its overall development [Электронный ресурс]. — [file:///C:/Users/Dell/Downloads/D%201387%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Dell/Downloads/D%201387%20(3).pdf) (дата обращения 15.08.2019).
32. **Mendoza-González G., Martínez M., Lithgow D., Pérez-Maqueo O., Simonin P.** Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the gulf of Mexico // *Ecol. Econ.* — 2012. — N 82. — P. 23–32.
33. **Wu K.-Y., Ye X.-Y., Qi Z.-F., Zhang H.** Impacts of land use/land cover change and socioeconomic development on regional ecosystem services: The case of fast-growing Hangzhou metropolitan area, China // *Cities.* — 2013. — N 31. — P. 276–284.
34. **Kindu M., Schneider T., Teketay D., Knoke T.** Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands // *Sci. Total. Environ.* — 2016. — N 547. — P. 137–147.
35. **Zhang Y., Zhao L., Liu J., Liu Y., Li C.** The impact of land cover change on ecosystem service values in urban agglomerations along the coast of the Bohai Rim, China // *Sustainability.* — 2015. — N 7. — P. 10365–10387.

Поступила в редакцию 22.10.2019

После доработки 02.06.2020

Принята к публикации 25.09.2020