

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ В НАЦИОНАЛЬНОМ ПАРКЕ КЕОЛАДЕО – НА МЕСТЕ ЗИМОВКИ ЗАПАДНОСИБИРСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ СТЕРХА

© 2023

Болдырев С.Л.¹, Левых А.Ю.¹, Замятин Д.О.²¹Научный центр изучения Арктики (г. Салехард, Российская Федерация)²Департамент внешних связей Ямало-Ненецкого автономного округа (г. Салехард, Российская Федерация)

Аннотация. Работа посвящена изучению динамики площади водно-болотных угодий на территории Национального парка Кеоладео (провинция Бхаратпур, штат Раджастан, Индия) за последние десятилетия в связи с изменениями климатических параметров для оценки условий зимовки исчезающей западносибирской популяции стерха (*Leucogeranus* (= *Grus*) *leucogeranus* Pallas, 1773). В статье приведены результаты статистического анализа основных метеорологических параметров (средних максимальной и минимальной температур приземного слоя атмосферы в 1971–2022 гг., среднего количества осадков за год и с октября по март (период зимовки стерха) в 1958–2021 гг.); результаты анализа соотношения площадей разных типов местообитаний по данным дистанционного зондирования Земли в 1972–2022 гг.; результаты статистического анализа объема воды, поступающей в парк из водохранилища Аджан Бунд в 1980–2010 гг. За исследуемый период выявлено достоверное увеличение средних максимальной и минимальной температур зимнего периода, что наряду с отсутствием значимой тенденции к увеличению среднего количества осадков и увеличения количества засушливых лет свидетельствует о потеплении климата с нарастанием его засушливости. Установлено статистически значимое сокращение площади местообитаний, пригодных для стерха. Это свидетельствует о существенном снижении уровня воды в водно-болотных угодьях Кеоладео, как вследствие роста испарения, так и значимого сокращения объема воды, поступающей в парк из водохранилища. Результаты исследования показывают, что в условиях наблюдаемых изменений климата основными регуляторами уровня воды и состояния экосистемы водно-болотных угодий Кеоладео являются сельхозпользователи, потребление воды которыми растёт по мере нарастания засушливости климата.

Ключевые слова: *Leucogeranus leucogeranus*; западносибирская популяция; Национальный парк Кеоладео; водно-болотные угодья; нормализованный разностный вегетационный индекс; нормализованный разностный водный индекс; дистанционное зондирование Земли; метеорологические показатели.

WETLANDS DYNAMICS ANALYSIS: A CASE STUDY OF KEOLADEO NATIONAL PARK (INDIA), THE WINTERING GROUNDS OF WEST SIBERIAN WHITE CRANE POPULATION

© 2023

Boldyrev S.L.¹, Levykh A.Yu.¹, Zamyatin D.O.²¹Arctic Research Center (Salekhard, Russian Federation)²Department for External Relations of Yamal-Nenets Autonomous Okrug (Salekhard, Russian Federation)

Abstract. The work is devoted to the study of the dynamics of the wetlands area in the Keoladeo National Park (Bharatpur province, Rajasthan, India) over the past decades in connection with changes in climatic parameters to assess the wintering conditions of the endangered West Siberian White Crane population (*Leucogeranus* (= *Grus*) *leucogeranus* Pallas, 1773). The article presents the results of a statistical analysis of the main meteorological parameters (average maximum and minimum temperatures of the surface layer of the atmosphere in 1971–2022, average precipitation per year and from October to March (the wintering period of West Siberian White Crane) in 1958–2021); the results of an analysis of the ratio of areas of different types of habitats according to remote sensing data in 1972–2022; the results of statistical analysis of the volume of water entering the park from the Ajahn Bund reservoir in 1980–2010. During the study period, a significant increase in the average maximum and minimum temperatures of the winter period was revealed, which, along with the absence of a significant trend towards an increase in the average amount of precipitation and an increase in the number of dry years, indicates a warming climate with an increase in its aridity. A statistically significant reduction in the area of habitats suitable for West Siberian White Crane has been established. This indicates a significant decrease in the water level in the Keoladeo wetlands, both due to increased evaporation and a significant reduction in the volume of water entering the park from the reservoir. The results of the study show that in the conditions of observed climate changes, the main regulators of the water level and the state of the ecosystem of the Keoladeo wetlands are agricultural users, whose water consumption increases with increasing aridity of the climate.

Keywords: *Leucogeranus leucogeranus*; West Siberian White Crane population; Keoladeo National Park; wetlands; normalized difference vegetation index; normalized difference water index; remote sensing of the Earth; meteorological indicators.

Введение

На территории Национального парка Кеоладео (округ Бхаратпур, штат Раджастан, Индия) (27°7,6'–

27°12,2' с.ш., 77°29,5'–77°33,2' в.д.) располагаются одни из самых крупных в полупустынной зоне, искусственно созданных пресноводных водно-болот-

ных угодий (ВБУ) международного значения, где зимуют от десятков до сотен тысяч особей водных и околоводных птиц, в том числе до 2001 г. на зимовке отмечались стерхи (*Leucogeranus* (= *Grus*) *leucogeranus* Pallas, 1773) западносибирской популяции [1, с. 24; 2, с. 106, 107, 109] (рис. 1).

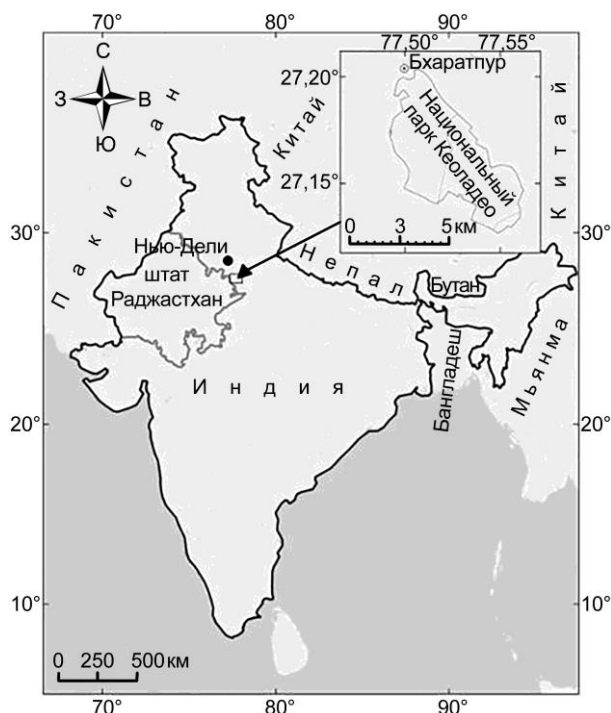


Рисунок 1 – Местоположение Национального парка Кеоладео на карте-схеме Индии

Водно-болотные угодья охватывают центральную впадину парка площадью около 8,5 км² [2, с. 106]. Основными источниками воды для ВБУ являются дождевые осадки и вода, поступающая через канал Гана из водохранилища Аджан Бунд (Ajanbund) [3, р. 248]. В литературе описаны частые колебания с большой амплитудой объёма воды, поступающей из водохранилища в водно-болотные угодья парка (например, в 1966–1990 гг.: 0,017 × 10⁶ – 15,0 × 10⁶ м³), значительное сокращение поступления воды в 1980–е гг. [3, р. 249] и сохранение этой тенденции в течение 36-летнего периода с 1980 по 2015 гг. [4, р. 1075]. Это обсуждается как одна из причин деградации экосистемы водно-болотных угодий и последующего снижения количества зимующих в Кеоладео стерхов [2, с. 106, 108; 4, р. 1076]. По данным Р. Двеведи (Dwevedi) с соавторами [4, р. 1076], резкое и необратимое сокращение популяций многих видов водоплавающих и околоводных птиц на территории парка началось сразу после сильной засухи 1987 г.; максимальное сокращение численности птиц произошло в десятилетие частых засух с 2000 по 2009 гг. А. Кумар с соавторами [2, с. 108] сообщают, что существенное сокращение поступления в парк воды из водохранилища произошло после строительства в 2003 г. большой дамбы (Пачна) на реке Гамбири, питающей водохранилище Аджан Бунд, в результате чего в водохранилище почти перестала поступать вода из реки, и в настоящее время Национальный парк Кеоладео практически полностью зависит от сезонных дождевых осадков, количество и регулярность поступления которых в связи с измене-

ниями климата могут изменяться, повышая вероятность в дальнейшем экстремальных условий.

Для сохранения западносибирской популяции стерха, являющейся одним из приоритетных объектов изучения и охраны на национальном и международном уровнях (категория редкости: в Красном списке МСОП для вида в целом – CR A3bcd (на грани полного исчезновения), в Красной книге РФ для западной (западносибирской, или обской популяции) по шкале МСОП – CR D (популяция, находящаяся под критической угрозой исчезновения)) [5, с. 680] необходимо знание факторов, ограничивающих воспроизводство и численность вида на территории всего ареала.

Цель данной работы заключалась в изучении динамики площади водно-болотных угодий на территории Национального парка Кеоладео за последние десятилетия, в связи с изменениями климатических параметров, для оценки условий зимовки западносибирской популяции стерха (*Leucogeranus* (= *Grus*) *leucogeranus* Pallas, 1773).

Материалы и методика исследований

В качестве переменных для анализа изменений климата использовали средние минимальную и максимальную температуры приземного слоя атмосферы в зимнее время (с октября по март следующего года, что соответствует периоду зимовки стерха в Национальном парке Кеоладео) в 1971–2022 гг., среднегодовое и среднее за зимние месяцы количество осадков в 1958–2021 гг. Данные о температуре загрузили с сайта индийского метеорологического департамента (IMD) [6], сведения о количестве осадков и количестве воды, поступающей в систему каналов Гана в период с 1980 по 2010 гг., – с сайта Департамента водных ресурсов Раджастанха [7]. Расчёт площади водно-болотных угодий в Национальном парке Кеоладео в 1972–2022 гг. осуществляли по данным дистанционного зондирования (ДЗЗ) Landsat 7 и 8, полученным с сайта геологической службы США (USGS) с помощью сервиса Glovis [8]. Для повышения разрешения данных применили панхроматический диапазон [9]. Используемые диапазоны данных Landsat 7 и Landsat 8, длины волн и их разрешение приведены в таблице 1.

Полученные снимки обрабатывали в среде QGIS Desktop 3.28. Для определения площади водно-болотных угодий рассчитали NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс) и NDWI (Normalized Difference Water Index – нормализованный разностный водный индекс), при этом использовали зелёный, красный, ближний инфракрасный и инфракрасный диапазоны.

Расчёт NDVI производили по формуле [10, с. 99; 11, р. 1428]:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red).$$

Для данных Landsat 7:

$$NDVI = (Band\ 4 - Band\ 3) / (Band\ 4 + Band\ 3).$$

Для Landsat 8:

$$NDVI = (Band\ 5 - Band\ 4) / (Band\ 5 + Band\ 4).$$

Большее значение NDVI характеризует более высокое ближнее инфракрасное излучение (NIR), что означает большую продуктивность зелёной растительной массы.

Таблица 1 – Характеристики данных Landsat 7 и Landsat 8

№ п/п	Landsat 7 Усовершенствованный тематический картограф Plus (ETM+)			Канал (Band)	Оперативный наземный тепловизор Landsat 8 (OLI) и тепловой инфракрасный датчик (TIRS)		
	Разрешение, м	Длина волны, мкм	Диапазон канала		Диапазон канала	Длина волны, мкм	Разрешение, м
1	30	0,45–0,52	Синий (Blue)	Band 1	Ультрасиний (Ultra-Blue)	0,435–0,451	30
2	30	0,52–0,60	Зелёный (Green)	Band 2	Синий (Blue)	0,452–0,512	30
3	30	0,63–0,69	Красный (Red)	Band 3	Зелёный (Green)	0,533–0,590	30
4	30	0,77–0,90	Ближний инфракрасный (NIR)	Band 4	Красный (Red)	0,636–0,673	30
5	30	1,55–1,75	Инфракрасный (SWIR 1)	Band 5	Ближний инфракрасный (NIR)	0,851–0,879	30
6	60 × (30)	10,40–12,50	Термальная (Thermal)	Band 6	Инфракрасный 1 (SWIR 1)	1,566–1,651	30
7	30	2,09–2,35	Инфракрасный SWIR 2	Band 7	Инфракрасный 2 (SWIR 2)	2,107–2,294	30
8	15	0,52–0,90	Панхроматический (Panchromatic)	Band 8	Панхроматический (Panchromatic)	0,503–0,676	15
9				Band 9	Перистые облака Cirrus	1,363–1,384	30
10				Band 10	(Термальная 1) TIRS 1	10,60–11,19	100 × (30)
11				Band 11	(Термальная 2) TIRS 2	11,50–12,51	100 × (30)

NDWI определяет количество влагозапаса в растительном покрове, взаимодействующее с поступающим солнечным излучением. Этот индекс чувствителен к изменениям влажности, но менее чувствителен к атмосферным воздействиям, чем NDVI. Сопряжённое использование обоих индексов позволяет более чётко определить границы водно-болотных угодий. NDWI рассчитывается по формуле [11, р. 1428; 12]:

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR).$$

Для данных Landsat 7:

$$NDWI = (Band 4 - Band 5) / (Band 4 + Band 5).$$

Для данных Landsat 8:

$$NDWI = (Band 5 - Band 6) / (Band 5 + Band 6).$$

В связи с тем, что NDWI даёт погрешность при расчёте площадей чистой воды, для улучшения дифференциации характеристик связанных с водой ландшафтов в данной работе использовали его модификацию mNDWI (следующая формула) [12]:

$$mNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR).$$

Для данных Landsat 7:

$$mNDWI = (Band 2 - Band 5) / (Band 2 + Band 5).$$

Для данных Landsat 8:

$$mNDWI = (Band 3 - Band 6) / (Band 3 + Band 6).$$

Алгоритм mNDWI позволяет эффективно подавлять шумовые эффекты с поверхности, с почвы и растительности и более точно выделять водные объекты [12]. Оба индекса могут принимать значения от -1 до 1 [10, с. 99; 12].

С помощью инструмента «калькулятор растра» QGIS Desktop 3.28 по расчётным значениям индексов NDVI и mNDWI вычисляли интересующие диапазоны значений. Затем растровое изображение переводили в векторный формат и с помощью инструмента «калькулятор полей» высчитывали площадь интересующих объектов.

Оценку достоверности изменений количества осадков, температур и водообеспеченности между десятилетиями проводили путём попарного межвыборочного сравнения с помощью t-критерия Стьюдента [13, с. 113–118]. Взаимосвязь между независимыми переменными определяли по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена (R) [14, с. 69–72]. Выбор временного диапазона анализируемых метеорологических и геоинформационных данных обусловлен необходимостью выявления недавних изменений климата, определяющих современное состояние водно-болотных угодий Национального парка Кеоладео.

В работе основывались на определении водно-болотных угодий, приведённом в Рамсарской конвенции [15, р. 260].

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели количества осадков на территории Национального парка Кеоладео в период с 1958 по 2021 гг. претерпевали значительные колебания: среднегодовое количество осадков – с разбросом в 6,9 раза (18,21_{min} мм – в 1978 г., 125,42_{max} мм – в 2018 г.); среднее количество осадков за зимние месяцы – с разбросом по десятилетиям – в 1,01–1,46 раза (45,54_{min} мм – в 1980-е гг.; 66,44_{max} мм – в 2020-е гг.) (рис. 2; табл. 2). Наиболее продолжительный период с пониженным количеством осадков отмечен в 1984–1992 гг. В целом за весь анализируемый период наблюдается статистически незначимая тенденция к увеличению среднегодового количества осадков на 3,39 мм (рис. 2).

Наибольшая амплитуда варьирования средней максимальной температуры зимних месяцев в период с 1971 по 2022 гг. составила по годам – 1,09 раза (на 2,4°C), по десятилетиям – 1,03 раза (на 0,81°C) (рис. 3; табл. 2). Минимальное значение этого показателя (+27,5°C) отмечено в 1984 г., максимальное

(+29,9°C) – в 2006 и 2016 гг. В самый продолжительный относительно стабильный по данному параметру период – в 1999–2003 гг. его колебания не превышали 0,1°C. Наиболее резкое увеличение средней максимальной температуры зимнего периода (на 2,1°C) произошло в период с 1984 по 1988 гг., а наиболее значительное (на 1,7°C) снижение этого показателя – с 2007 по 2008 гг. Однако в целом с 1970-х по 2020-е годы наблюдается тренд к повышению средней максимальной температуры зимних месяцев на 0,3°C. Установлено статистически значимое увеличение данного показателя в 2000-х и 2010-х гг. по сравнению с 1970-ми годами ($t = 3,27$; $p \leq 0,01$ и $t = 2,63$; $p \leq 0,05$), и в 2010-х гг. по сравнению с 1980-ми годами ($t = 2,93$; $p \leq 0,01$).

Многолетний тренд к повышению установлен также для хода изменений средней минимальной температуры зимних месяцев в 1971–2022 гг. (рис. 4; табл. 2). Наименьшее значение данного показателя отмечено в 1972 г. (+13,0°C), наибольшее (+15,3°C) – в 2009 и 2016 гг. Разброс значений данного параметра и по годам, и по десятилетиям сопоставим с таковым для средней максимальной температуры зимнего периода – соответственно, в 1,18 раза (на 2,3°C) и 1,06 раза (на 0,81°C). В 1977–1980 гг. отмечается наиболее длительный период увеличения среднегодовой минимальной температуры (в среднем на 0,5°C), затем после 1987 г. – продолжительное снижение этого показателя с минимальным значением (+13,5°C) в 1988 г. и повторным достижением исходного значения 1987 г. (+15,1°C) только в 2007 г. Установлено статистически значимое возрастание средней минимальной температуры в зимний период в 2010-х годах по сравнению с 1970-ми годами ($t = 3,43$; $p \leq 0,01$). В целом с 1971 по 2022 гг. средняя минимальная температура зимнего периода увеличилась на 0,6°C.

Распределение средних максимальной и минимальной температур зимних месяцев в период с 1970-х по 2020-е годы подтверждает феномен потепления климата на исследованной территории. Значимый рост температур может способствовать усилению испарения воды (транспирации) и тем самым нивелировать влияние незначительного увеличения среднегодового количества осадков.

В то же время нами выявлен тренд к сокращению водоснабжения парка через канал Гана с 1980 по

2015 гг., подтверждённый значимо меньшим объёмом поступившей в парк воды в 2000-е гг. по сравнению с 1980-ми и 1990-ми (соответственно, $t = 2,88$, $p \leq 0,05$; $t = 2,6$, $p \leq 0,05$) (рис. 5; табл. 3). Это согласуется с литературными данными о развитии сельского хозяйства в верховьях реки Гамбири и об ограничении сельхозпользователями отведения воды из водохранилища в Кеоладео после строительства дамбы Пачна в 2003 г. [2, с. 108; 16, р. 37].

Установлено также, что в период с 1980-х по 2020 годы средняя за десятилетие площадь ВБУ уменьшилась в 12 раз (рис. 6, 7; табл. 3). Несмотря на то, что в отдельные годы (1999, 2014, 2018) анализируемого периода площадь ВБУ достигала уровня 1980-х годов, выявлена общая многолетняя тенденция к уменьшению этого показателя (рис. 6), подтверждаемая достоверно меньшей средней площадью ВБУ парка в 2010-е годы по сравнению с 1990-ми и 2000-ми (соответственно, $t = 4,86$, $p \leq 0,001$; $t = 3,65$, $p \leq 0,01$), в 2020-е годы по сравнению с 2000-ми ($t = 8,6$, $p \leq 0,01$).

В то же время статистически значимой связи между площадью водно-болотных угодий Национального парка Кеоладео и показателями водообеспеченности – объёмом воды, поступающей через канал Гана и средним количеством осадков в зимний период не выявлено (соответственно, $R = 0,07$, $R = -0,12$). Последнее отчасти можно объяснить преобладанием испарения над поступлением осадков в зимний период, что отмечалось ранее для весенне-летнего периода [16, р. 41] и косвенно подтверждается хоть и слабой по силе, но статистически значимой, отрицательной корреляцией между средней максимальной температурой зимнего периода и обводнённостью канала Гана ($R = -0,43$). Отсутствие корреляции между площадью ВБУ и обводнённостью канала Гана можно объяснить ограничением поступления воды через канал в ВБУ фермерами, т.е. действием антропогенного фактора [2, с. 108].

Анализ соотношения разных типов местообитаний в Национальном парке Кеоладео показал, что в течение всего исследуемого периода максимальную площадь занимали луга с преобладанием аридной растительности. В среднем по десятилетиям их доля составляла от 27,4 до 57,8% от площади ВБУ (рис. 7; табл. 4).

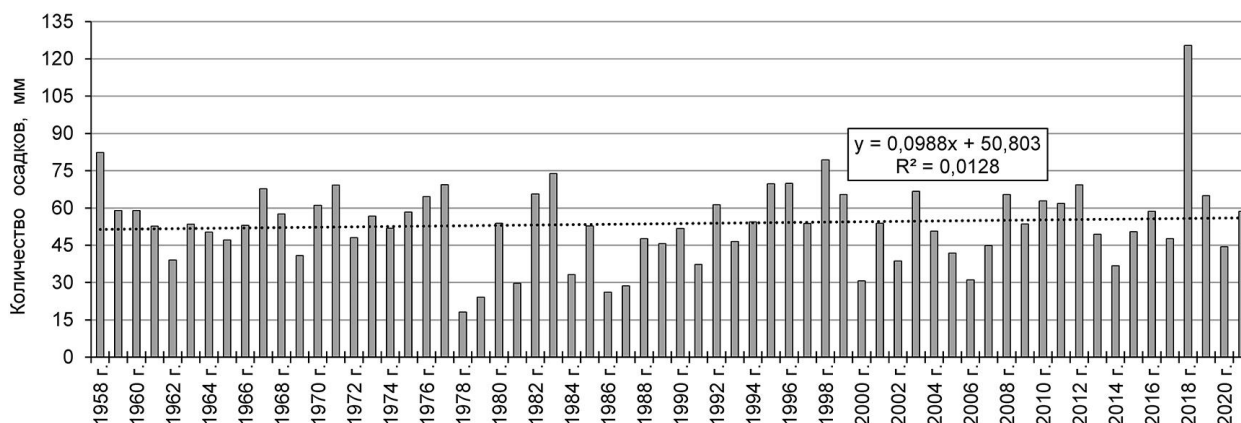


Рисунок 2 – Динамика среднегодового количества осадков по данным метеостанции Бхаратпур штата Раджастанх (1958–2021 гг.)

Таблица 2 – Основные метеорологические показатели зимнего периода на территории Национального парка Кеоладео в 1970-е – 2020-е годы

№ п/п	Годы	Метеорологические показатели ($\bar{x}_{\text{ср}} \pm S_x$)		
		среднее количество осадков в зимний период, мм	температуры зимнего периода, °C	
			средняя максимальная температура	средняя минимальная температура
1	1970-е	51,46 ± 5,53	28,36 ± 0,59	14,02 ± 0,63
2	1980-е	45,54 ± 5,68	28,62 ± 0,64	14,61 ± 0,49
3	1990-е	56,87 ± 4,35	28,78 ± 0,44	14,36 ± 0,40
4	2000-е	50,99 ± 3,95	28,99 ± 0,47	14,54 ± 0,55
5	2010-е	60,92 ± 8,51	29,17 ± 0,59	14,76 ± 0,46
6	2020-е	66,44 ± 7,78	28,67 ± 0,55	14,83 ± 0,15

Примечание. $\bar{x}_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение признака; S_x – ошибка средней арифметической.

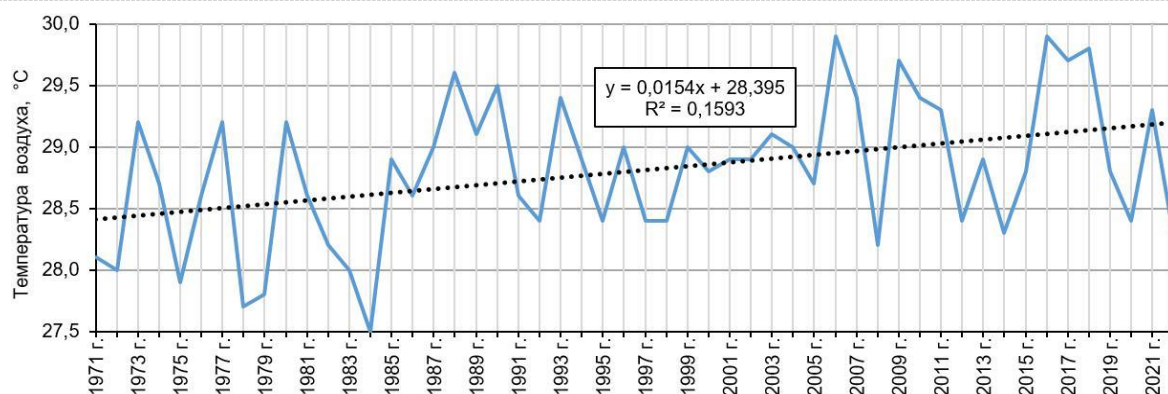
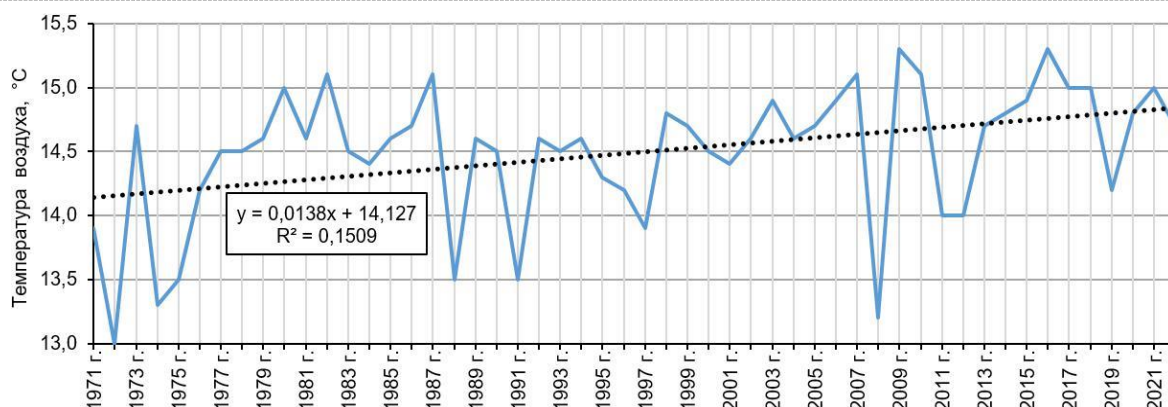
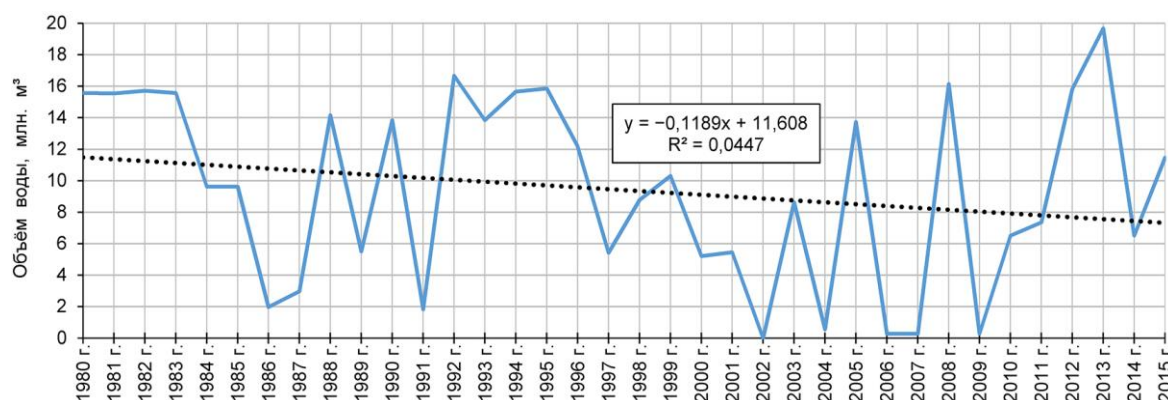
**Рисунок 3** – Динамика средней максимальной температуры воздуха зимнего периода по данным метеостанции Бхаратпур штата Раджастанх (1971–2022 гг.)**Рисунок 4** – Динамика средней минимальной температуры воздуха зимнего периода по данным метеостанции Бхаратпур штата Раджастанх (1971–2022 гг.)**Рисунок 5** – Изменения объема воды, поступающей в Национальный парк Кеоладео по каналу Гана

Таблица 3 – Показатели обеспеченности водными ресурсами водно-болотных угодий Национального парка Кеоладео

№ п/п	Годы	Средний объём воды, поступающей по системе каналов в Национальный парк Кеоладео, млн м ³	Площадь, занятая водно-болотными угодьями, га
1	1970-е	–	584,79 ± 173,98
2	1980-е	10,63 ± 5,51	2034,92 ± 978,37
3	1990-е	11,44 ± 4,86	2018,16 ± 758,55
4	2000-е	5,06 ± 6,01	1520,87 ± 308,22
5	2010-е	11,22 ± 5,51	400,79 ± 373,56
6	2020-е	–	168,62 ± 74,16

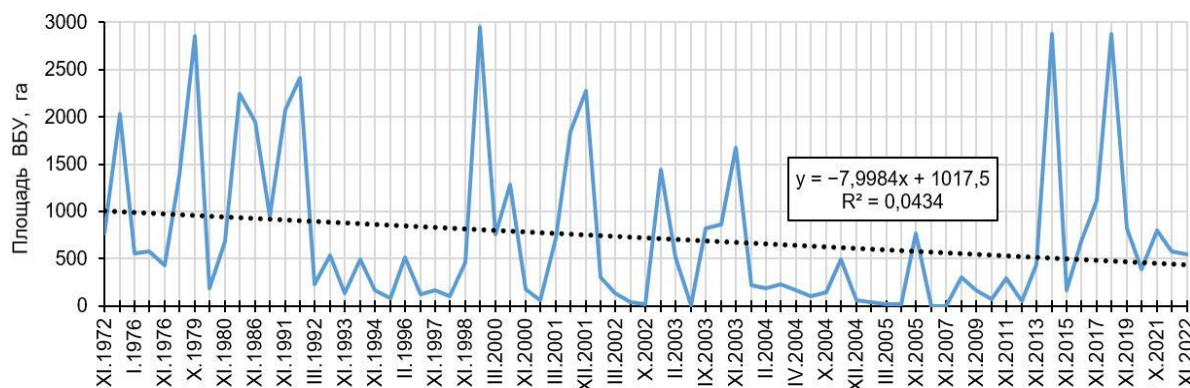


Рисунок 6 – Динамика площади водно-болотных угодий Национального парка Кеоладео

Далее по уменьшению удельного вклада в общую площадь ВБУ идут сырые луга с гидрофильной растительностью (8,5–50,2%), водно-болотная растительность (2,3–37,3%), пустоши и илистые отмели (0,8–33,3%), открытая вода (0,1–9,6%). В течение последних 50 лет несколько увеличилась площадь аридных лугов (в 1,4 раза), происходили значительные колебания площади лугов с гидрофильной растительностью (в 5,9 раза), существенно колебалась (в 16,2 раза) и значительно сократилась (в 3,95 раза) площадь местообитаний с водно-болотной растительностью (табл. 4). Всё это свидетельствует о существенных колебаниях и, в целом, о тенденции к понижению уровня воды в водно-болотных угодьях Кеоладео – фактора, который оказывает определяющее влияние на пространственно-биотопическую структуру, экологическое состояние («здоровье») экосистемы водно-болотных угодий [17; 18], в т.ч. наличие, распределение, доступность пищевых объектов [19, р. 83; 20, р. 142, 149; 21; 22, р. 133; 23, р. 320; 24, р. 35; 25, р. 381] и, наряду с площадью водно-болотных угодий, – на выбор местообитаний у журавлеобразных [4, р. 1072–1080; 16, р. 29–30; 18; 26, р. 950, 958–959].

Б. Чен (Chen) с соавторами [27, р. 84] установили взаимосвязь между уровнем воды в системе озера Поянг (Китай) и количеством зимующих там стерхов: отрицательную корреляцию с экстремально низким уровнем воды, положительную – с низким и средним уровнями. К аналогичным выводам пришли и другие исследователи [28; 29, р. 47–70, 99–119; 30, р. 343; 31, р. 2078; 32, р. 16836], определив, что мелководные биотопы предпочтительнее для журавлеобразных и аистообразных, чем глубоководные, так как при низком и среднем уровнях воды повышаются продуктивность местообитаний и эффективность тактильного поиска и сбора пищи, присущего этим птицам. Очень низкий уровень воды обуславливает снижение экологической ёмкости ВБУ, уве-

личение меж- и внутривидовой конкуренции. В связи с этим показано, что в долгосрочной перспективе чередование периодов кратковременных засух и обводнений может положительно повлиять на качество среды обитания для журавлей – нечастые засухи могут способствовать обогащению водно-болотных угодий питательными веществами и повышению продуктивности рыбы и макробеспозвоночных [32, р. 16835; 33, р. 26; 34, р. 158–159; 35, р. 484, 489; 36, р. 2282].

Однако для территории Национального парка Кеоладео, начиная с 1978 г. отмечаются частые засухи (рис. 2). По данным ДЗЗ видно, что именно мелководные местообитания (сырые луга с гидрофильной растительностью и водно-болотная растительность) в Кеоладео претерпевали по десятилетиям самые значительные колебания, площадь ВБУ – самое значительное сокращение (рис. 7; табл. 4). Обсуждаемые изменения ландшафтной структуры ВБУ Национального парка Кеоладео согласуются с сокращением количества стерхов на зимовке (рис. 8) [2, с. 106–107; 16, р. 43].

В целом, результаты проведённого исследования свидетельствуют о существенном ухудшении местообитаний стерха на зимовке в Национальном парке Кеоладео вследствие совместного влияния климатических изменений в регионе (возрастания засушливости климата, увеличения количества засушливых лет) и развития в этих условиях экстенсивного сельского хозяйства, для которого используются подземные воды и осуществляется перехват воды водозабором, ведущие к значимому сокращению притока воды в парк. Это согласуется с результатами анализа общего состояния водных ресурсов Раджастанха, показывающего недостаток воды в штате вследствие нерегулярности и малого количества осадков, истощения уровня грунтовых вод, уменьшения количества и доступности поверхностных вод из-за стремительного сокращения площади земель, участвующих в поверхностном стоке [37, р. 276; 38, р. 732].

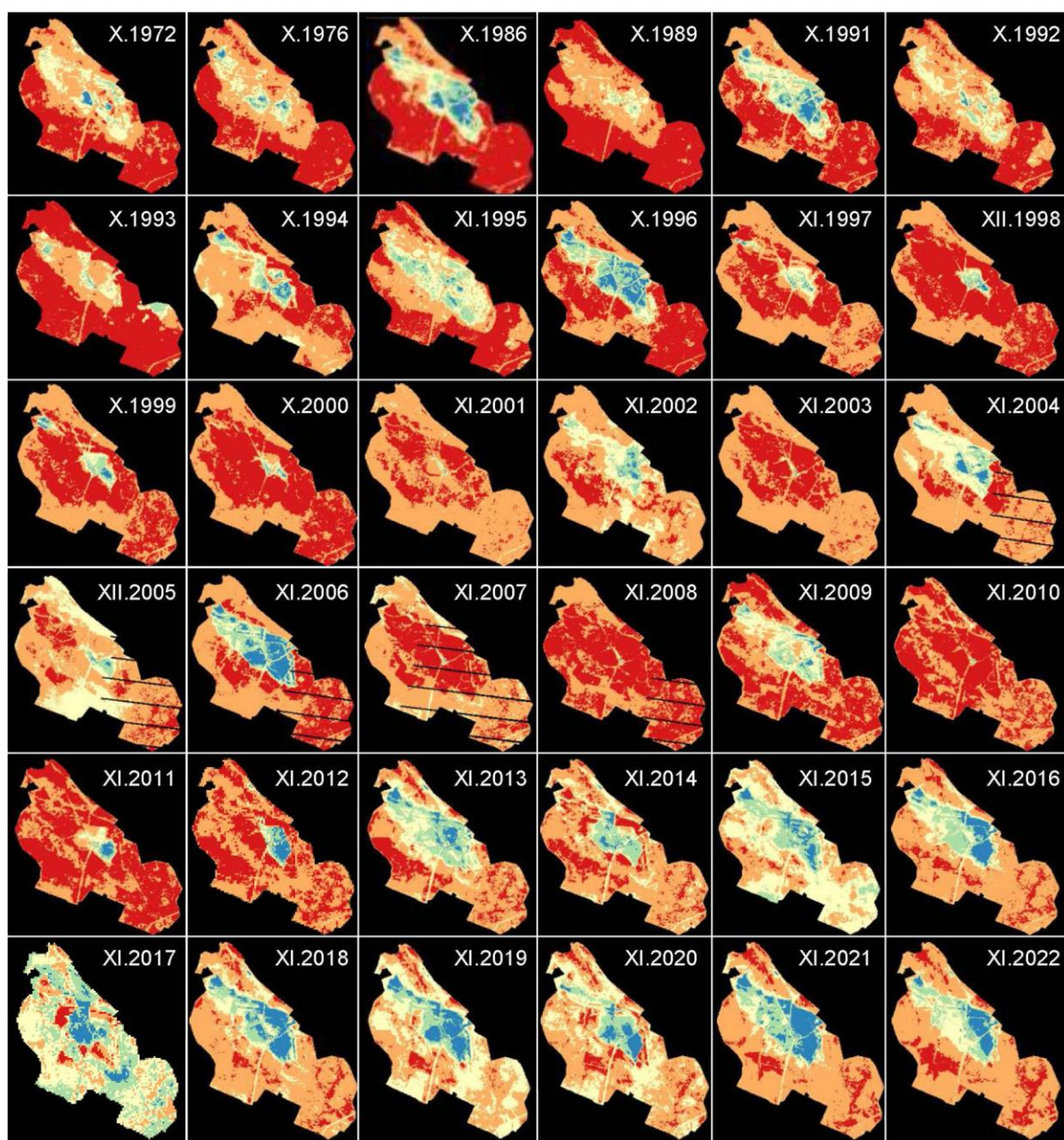


Рисунок 7 – Динамика водно-болотных угодий Национального парка Кеоладео в 1972–2022 гг. (по данным дистанционного зондирования Земли). Красным цветом отображены участки с наименьшим увлажнением (пустыри, участки с древесной растительностью); оранжевым – участки с незначительным увлажнением (луга с преобладанием аридной растительности, кустарниковые заросли); светло-жёлтым – луга с преобладанием гидрофильной растительности; оттенками зелёного цвета – зоны с преобладанием водно-болотной растительности, или участки поверхности с высокой влажностью (мелководья, отмели); синим – участки открытой воды

Таблица 4 – Соотношение разных типов местообитаний в составе водно-болотных угодий Национального парка Кеоладео в период с 1970 по 2020 гг.

Годы	Средняя за 10 лет площадь разных типов местообитаний, км ² (доля площади местообитания от общей площади водно-болотных угодий, %)				
	Открытая вода	Водно-болотная растительность	Луга с преобладанием гидрофильной растительности	Луга с преобладанием аридной растительности	Пустоши, илистые отмели
1970	2,07 (7,1%)	10,83 (37,3%)	2,46 (8,5%)	12,34 (42,6%)	1,30 (4,5%)
1980	0,36 (1,2%)	6,30 (21,7%)	9,30 (32,1%)	11,58 (39,9%)	1,46 (5,0%)
1990	0,40 (0,1%)	0,67 (2,3%)	3,76 (13,0%)	14,52 (50,1%)	9,65 (33,3%)
2000	2,19 (7,6%)	1,17 (4,0%)	2,72 (9,4%)	15,22 (52,5%)	7,70 (26,6%)
2010	2,17 (7,5%)	4,12 (14,2%)	14,55 (50,2%)	7,94 (27,4%)	0,22 (0,8%)
2020	2,77 (9,6%)	2,74 (9,4%)	3,16 (10,9%)	16,77 (57,8%)	3,56 (12,3%)
Средние значения	1,66 (5,7%)	4,31 (14,9%)	5,99 (20,7%)	13,06 (45,0%)	3,98 (13,7%)

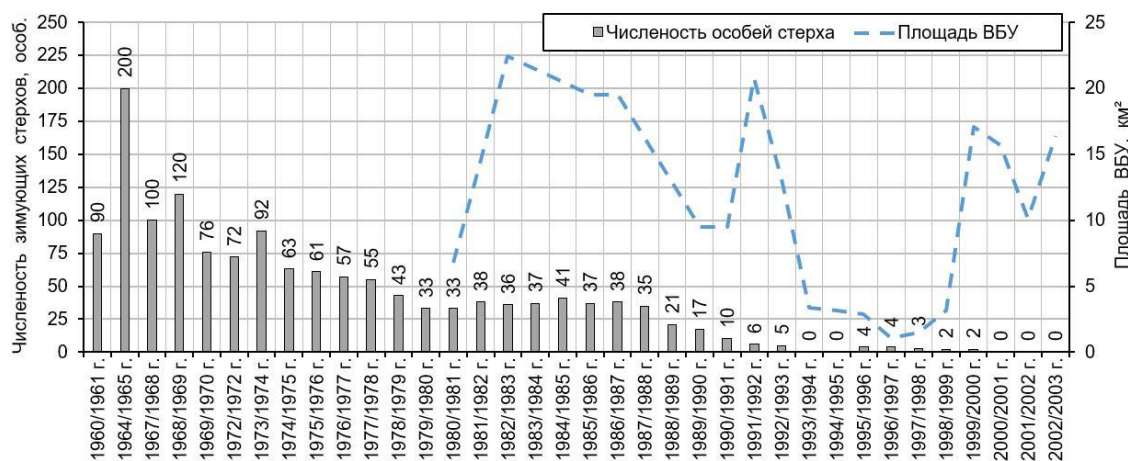


Рисунок 8 – Динамика встречаемости *L. leucogeranus* на зимовках и площади водно-болотных угодий в Национальном парке Кеоладео

Выводы

Выявленный на территории Национального парка Кеоладео в течение продолжительного времени рост минимальной и максимальной температур приземного слоя атмосферы в сезон зимовки стерха наряду с отсутствием значимого роста количества атмосферных осадков и увеличением количества засушливых лет свидетельствуют о потеплении климата на этой территории с тенденцией к нарастанию его засушливости.

Значимое сокращение в водно-болотных угодьях Кеоладео в течение длительных периодов времени площадей, занятых гидрофильными лугами и водно-болотной растительностью – местообитаниями, пригодными для стерха, свидетельствует о существенном сокращении уровня воды, причинами которого являются рост испарения (транспирации), увеличение количества лет с пониженным количеством осадков (засушливых) вследствие потепления климата и сокращение объёма воды, поступающей в парк из водохранилища в связи с ростом потребления воды на сельскохозяйственные нужды.

В условиях потепления и нарастания засушливости климата основными регуляторами воды в искусственно созданных водно-болотных угодьях Кеоладео и, соответственно, регуляторами экологического состояния и ёмкости местообитаний в районе зимовки обской популяции стерха являются сельхозпользователи.

Список литературы:

1. Ильяшенко Е.И. Белый журавль – стерх. М., 2014. 36 с.
2. Кумар А., Гописундар К.Ш., Ануп К.Р. Национальный парк Кеоладео (Гана) // Атлас ключевых территорий для стерха и других околоводных птиц Западной и Центральной Азии / ред.-сост. Е.И. Ильяшенко. Барабу, 2010. С. 105–109.
3. Rai V. Modeling a wetland system: the case of Keoladeo National Park (KNP), India // Ecological Modelling. 2008. Vol. 210, iss. 3. P. 247–252. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.07.031.
4. Dwevedi R., Deo V., Sethy J., Gupta R., Mylswamy M. Performance of imputation-based models in predicting breeding population trend of a near-threatened bird in changing water regime: A 36-year long-term case study of Painted Stork, *Mycteria leucocephala* // Journal of Applied and Natural Science. 2021. Vol. 13, iss. 3. P. 1072–1082. DOI: 10.31018/jans.v13i3.2876.
5. Сорокин А.Г., Шилина А.П. Стерх – *Grus leucogeranus* (Pallas, 1773). Западная популяция // Красная кни-

га Российской Федерации. Том «Животные». 2-е изд. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. С. 680–682.

6. Climate Research & Services Pune [Internet] // IMD Data Supply Portal. India Meteorological Department. <https://dsp.imdpune.gov.in>.

7. Water sector [Internet] // Government of Rajasthan. <https://water.rajabasthan.gov.in>.

8. Science for a changing world [Internet] // United States Geological Survey. <https://glovis.usgs.gov/app>.

9. Kshetri T.B. NDVI, NDBI & NDWI calculation using Landsat 7, 8 // GeoWorld. 2018. Vol. 2. P. 32–34.

10. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Гео-матика. 2011. № 2. С. 98–102.

11. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International journal of remote sensing. 1996. Vol. 17, iss. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.

12. Морозова В.А. Расчёт индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования [Электронный ресурс] // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. <https://terjournal.ru/2019/id85>.

13. Лакин Г.Ф. Биометрия: учеб. пособие. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1990. 350 с.

14. Ивантер Э.В., Коросов А.В. Элементарная биометрия: учеб. пособие. 3-е изд., испр. и доп. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. 110 с.

15. Конвенция о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, главным образом, в качестве местообитаний водоплавающих птиц // United Nations – Treaty Series. 1976. Vol. 996. P. 260–264.

16. Chopra K., Adhikari S.K. Environment development linkages: modelling a wetland system for ecological and economic value // Environment and Development Economics. 2004. Vol. 9, iss. 1. P. 19–45. DOI: 10.1017/s1355770x03001037.

17. You H., Fan H., Xu L., Wu Y., Liu L., Yao Z. Poyang lake wetland ecosystem health assessment of using the wetland landscape classification characteristics // Water. 2019. Vol. 11, iss. 4. DOI: 10.3390/w11040825.

18. Zou L., Hu B., Qi S., Zhang Q., Ning P. Spatiotemporal variation of Siberian crane habitats and the response to water level in Poyang Lake Wetland, China // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, iss. 1. DOI: 10.3390/rs13010140.

19. Frederick P., Gawlik D.E., Ogden J.C., Cook M.I., Lusk M. The White Ibis and Wood Stork as indicators for restoration of the everglades ecosystem // Ecological indicators. 2009. Vol. 9, iss. 6. P. 83–95. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.10.012.

20. Gao Y., Xie Y.-H., Zou D.-S. Hydrological regime change and its ecological responses in East Dongting Lake, China // Ecohydrology & Hydrobiology. 2020. Vol. 20, iss. 1. P. 142–150. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2019.07.003.

21. Zhang D., Zhou L., Song Y. Effect of water level fluctuations on temporal-spatial patterns of foraging activities by the wintering Hooded Crane (*Grus monacha*) // Avian Research. 2015. Vol. 6, iss. 1. DOI: 10.1186/s40657-015-0026-x.
22. Wang W., Fraser J.D., Chen J. Distribution and long-term population trends of wintering waterbirds in Poyang Lake, China // Wetlands. 2019. Vol. 39. P. 125–135. DOI: 10.1007/s13157-017-0981-6.
23. Senner N.R., Moore J.N., Seager S.T., Dougill S., Kreuz K., Senner S.E. A salt lake under stress: Relationships among birds, water levels, and invertebrates at a Great Basin saline lake // Biological Conservation. 2018. Vol. 220. P. 320–329. DOI: 10.1016/j.biocon.2018.02.003.
24. Chastant J.E., Gawlik D.E. Water level fluctuations influence wading bird prey availability and nesting in a subtropical lake ecosystem // Waterbirds. 2018. Vol. 41, iss. 1. P. 35–45. DOI: 10.1675/063.041.0105.
25. Zhao H., Wang Y., Xu B., Chen X., Jiang Z. Exploring an efficient habitat index for predicting population and abundance of migratory birds in Poyang Lake Wetland, South China // Acta Ecologica Sinica. 2018. Vol. 38, iss. 6. P. 381–390. DOI: 10.1016/j.chnaes.2018.04.004.
26. Gnass Giese E.E., Howe R.W., Wolf A.T., Niemi G.J. Breeding birds and anurans of dynamic coastal wetlands in Green Bay, Lake Michigan // Journal of Great Lakes Research. 2018. Vol. 44, iss. 5. P. 950–959. DOI: 10.1016/j.jglr.2018.06.003.
27. Chen B., Cui P., Xu H., Lu X., Lei J., Wu Y., Shao M., Ding H., Wu J., Cao M., Liu G. Assessing the suitability of habitat for wintering Siberian cranes (*Leucogeranus leucogeranus*) at different water levels in Poyang lake area, China // Polish Journal of Ecology. 2016. Vol. 64, iss. 1. P. 84–97. DOI: 10.3161/15052249pje2016.64.1.008.
28. Wang Y., Gong M., Zou C., Zhou T., Wen W., Liu G., Li H., Tao W. Habitat selection by Siberian Cranes at their core stopover area during migration in Northeast China // Global Ecology and Conservation. 2022. Vol. 33. DOI: 10.1016/j.gecco.2021.e01993.
29. Urfi A.J. The Painted Stork: ecology and conservation. New York: Springer, 2011. 163 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8468-5.
30. Gawlik D.E. The effects of prey availability on the numerical response of wading birds // Ecological Monographs. 2002. Vol. 72, iss. 3. P. 329–346. DOI: 10.1890/0012-9615(2002)072[0329:teopao]2.0.co;2.
31. Xia S., Yu X., Fan N. The wintering habitats of migrant birds and their relationship with water level in Poyang Lake, China // Resources Science. 2010. Vol. 32, iss. 11. P. 2072–2078.
32. Bai J., Zhang H., Zhou H., Li S., Gao B., Chen P., Ma L., Xu Z., Zhang Z., Xu C., Ruan L., Ge G. Winter coexistence in herbivorous waterbirds: Niche differentiation in a floodplain, Poyang Lake, China // Ecology and Evolution. 2021. Vol. 11, iss. 23. P. 16835–16848. DOI: 10.1002/ece3.8314.
33. Reid J.R., Colloff M.J., Arthur A.D., McGinness H.M. Influence of catchment condition and water resource development on waterbird assemblages in the Murray-Darling Basin, Australia // Biological Conservation. 2013. Vol. 165. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.biocon.2013.05.009.
34. Wen L., Rogers K., Saintilan N., Ling J. The influences of climate and hydrology on population dynamics of waterbirds in the lower Murrumbidgee River floodplains in Southeast Australia: Implications for environmental water management // Ecological Modelling. 2011. Vol. 222, iss. 1. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.09.016.
35. Frederick P.C., Ogden J.C. Pulsed breeding of long-legged wading birds and the importance of infrequent severe drought conditions in the Florida Everglades // Wetlands. 2001. Vol. 21, iss. 4. P. 484–491. DOI: 10.1672/0277-5212(2001)021[0484:pbollw]2.0.co;2.
36. Gutreuter S., Bartels A.D., Irons K., Sandheinrich M.B. Evaluation of the flood-pulse concept based on statistical models of growth of selected fishes of the Upper Mississippi River system // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1999. Vol. 56, iss. 12. P. 2282–2291. DOI: 10.1139/f99-161.
37. Gupta N.K., Jethoo A.S., Gupta S.K. Rainfall and surface water resources of Rajasthan State, India // Water Policy. 2016. Vol. 18, iss. 2. P. 276–287. DOI: 10.2166/wp.2015.033.
38. Manwani M., Chauhan S. Trends of rainfall and urban water supply in Rajasthan State // International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT). 2021. Vol. 9, iss. 8. P. 732–746.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках проекта «Восстановление обской популяции стерха (белого журавля)».

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
Болдырев Степан Леонидович , научный сотрудник сектора биоразнообразия; Научный центр изучения Арктики (г. Салехард, Российская Федерация). E-mail: boldyrev-92@internet.ru.	Boldyrev Stepan Leonidovich , researcher of Biodiversity Sector; Arctic Research Center (Salekhard, Russian Federation). E-mail: boldyrev-92@internet.ru.
Левых Алёна Юрьевна , кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник сектора биоразнообразия; Научный центр изучения Арктики (г. Салехард, Российская Федерация). E-mail: aljurlev@mail.ru.	Levykh Alyona Yurievna , candidate of biological sciences, leading researcher of Biodiversity Sector; Arctic Research Center (Salekhard, Russian Federation). E-mail: aljurlev@mail.ru.
Замятин Дмитрий Олегович , заместитель начальника отдела координации научной деятельности; Департамент внешних связей Ямало-Ненецкого автономного округа (г. Салехард, Российская Федерация). E-mail: nauka89@mail.ru.	Zamyatin Dmitry Olegovich , deputy head of Division for the Coordination of Scientific Activities; Department for External Relations of Yamal-Nenets Autonomous Okrug (Salekhard, Russian Federation). E-mail: nauka89@mail.ru.

Для цитирования:

Болдырев С.Л., Левых А.Ю., Замятин Д.О. Анализ динамики водно-болотных угодий в Национальном парке Кеоладео – на месте зимовки западносибирской популяции стерха // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 3. С. 27–35. DOI: 10.55355/snv2023123103.