DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-88-119 УДК 551.58

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЕКТОВ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА НА ОСНОВЕ ЭКОСИСТЕМ В ДЕЛЬТЕ р. ИЛИ (КАЗАХСТАН)

О.Н. Липка[1)], Г.М. Мазманянц[2)], М.В. Исупова[3)], А.А. Алейников[4)], Д.Г. Замолодчиков[5)], В.В. Каганов[5)]*

[1)] Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б;
* адрес для переписки: *olipka@mail.ru*

[2)] WWF Центральной Азии,
Казахстан, 050051, г. Алматы, просп. Достык, д. 248Б, оф. 210

[3)] Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

[4)] ГК «СКАНЭКС»,
Россия, 108811, г. Москва, 22-ой км Киевского шоссе, домовладение 4, корп. А, оф. 819А

[5)] Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14

Реферат. Научное обоснование проектов по адаптации к изменениям климата на основе экосистем (ecosystem-based adaptation) носит комплексный характер и требует подтверждения следующих положений: территория действительно подвержена негативным последствиям изменения климата или будет подвержена в обозримом будущем; планируемые мероприятия действительно окажут необходимый адаптационный эффект; результаты будут устойчивы в перспективе при любых сценариях изменения климата; в случае использования экосистемных услуг лесов адаптационная деятельность должна иметь значимый митигационный эффект. В статье изложена методика изучения компонентов обоснования проекта по адаптации (изменение климата, изменение гидрологического режима, состояние ледниковых ресурсов для обеспечения стока, гидрологическая эффективность использования дельты в качестве естественного контррегулятора, условия для лесовосстановления, обеспечивающие достаточный адаптационный и митигационный результаты) на примере восстановления тугайных лесов в дельте р. Или (Казахстан). Полученные результаты исследований подтвердили эффективность и целесообразность планируемой адаптационной деятельности и ее методов.

Ключевые слова. Изменение климата, адаптация на основе экосистем, р. Или, оз. Балхаш, дельта, лесовосстановление.

Введение

Адаптация к изменениям климата на основе экосистем (*ecosystem-based adaptation – EbA*) часто переводится как «экосистемный подход к адаптации». Создается впечатление, что деятельность ведется на основе экосистемного подхода, который, по определению Конвенции о биологическом разнообразии, представляет собой стратегию комплексного управления земельными, водными и живыми ресурсами, обеспечивающую их сохранение и устойчивое использование на справедливой основе (КБР, 2003). В экосистемном подходе ведущую роль играет природоохранная направленность – сохранение экосистем и их компонентов при любом виде землепользования.

Термин «адаптация на основе экосистем» (или «адаптация с позиций экосистем») имеет другой смысл: «использование биоразнообразия и экосистемных функций и услуг в рамках общей стратегии адаптации, чтобы способствовать улучшению благосостояния общества, в том числе коренных народов и местных общин, и чтобы помочь людям адаптироваться к неблагоприятным последствиям изменения климата» (КБР, 2018). Здесь не идет речь о сохранении экосистем. Они могут быть трансформированы или заменены на искусственно-поддерживаемые, в том числе с доминированием чужеродных видов. Главный критерий – получение максимального эффекта с точки зрения адаптации к изменению климата за счет использования экосистемных услуг. Поэтому концептуально данный подход важно отличать от экосистемного подхода и адаптации экосистем, когда происходит естественное приспособление к меняющимся климатическим условиям или применяются меры для защиты экосистем от негативных погодно-климатических воздействий. При определенных условиях экосистемный подход и адаптация на основе экосистем могут применяться одновременно.

В настоящее время адаптация на основе экосистем рассматривается как наиболее эффективный метод адаптации к изменению климата с точки зрения создания благоприятной для человека экологической обстановки и множества сопутствующих преимуществ.

Зачастую обоснование эффективности деятельности в рамках адаптации на основе экосистем – процесс гораздо более трудоемкий, чем проектирование инженерных сооружений. Необходимо учитывать сложные взаимосвязи в природно-климатической среде, а также факторы воздействия, удаленные на значительные расстояния от места предполагаемого проекта.

Цель данной статьи – продемонстрировать методические подходы, которые могут быть использованы в крупномасштабных проектах по адаптации на основе экосистем на примере восстановления водорегулирующей функции дельты р. Или (Казахстан) посредством восстановление тугайных лесов.

Леса дельты р. Или ранее выполняли водорегулирующую функцию, способствуя накоплению воды во влажный период/годы с постепенной отдачей в озеро Балхаш в сухой сезон/маловодный год. Полог тени от крон предохранял почву от пересыхания в летнюю жару. После лесных пожаров (начиная с

активного освоения территории дельты в 70-х годах прошлого века до настоящего времени) большая часть поверхности дельты была преобразована в травянистые пастбища, леса сохранились лишь на 5% территории, в результате чего водорегулирующая функция дельты снизилась.

В условиях современного и прогнозируемого роста температуры воздуха во все сезоны, ведущего к росту эвапотранспирации и водопотребления, возрастает риск повторения на оз. Балхаш сценария деградации Аральского моря. Эта угроза объясняет необходимость в применении крупномасштабных мер по адаптации к изменению климата в бассейне р. Или для усиления водорегулирующих и водосберегающих экосистемных функций. Общая статистика показывает, что инвестиции в адаптацию к изменению климата и снижение риска природных катастроф, как правило, в 20-30 раз меньше, чем потери и ущерб в результате бедствий (Семенов и др., 2012). Таким образом, стал актуальным вопрос о масштабах деятельности в дельте р. Или, устойчивости в долгосрочной перспективе и сопутствующих экологических выгодах.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

– оценить современные и прогнозируемые изменения климата и их возможные последствия для конкретной территории;

– оценить водорегулирующую способность дельты р. Или и эффект от восстановления лесного покрова;

– оценить динамику ледников в верховьях р. Или с учетом изменений климата как фактор изменения стока в долгосрочной перспективе;

– на основе анализа современного состояния ландшафтов и растительности оценить наличие достаточного количества участков, потенциально пригодных для лесовосстановления;

– подобрать наиболее перспективные методы лесовосстановления и оптимальное соотношение используемых древесных пород.

Методы и материалы

В статье использовались материалы, собранные авторами в ходе подготовки Концептуальной Записки в Зеленый климатический фонд для проекта «Сохранение дельты р. Или – адаптация к изменениям климата через экосистемные услуги». Первоначально проект назывался «Усиление экосистемных услуг дельты р. Или для адаптации к изменениям климата», что более точно соответствует его содержанию.

Методика оценки воздействия изменений климата

Для оценки современных и прогнозируемых изменений климата, а также их последствий, были использованы литературные материалы, включая данные модельных прогнозов CMIP5 для сценариев RCP 2.6, 4.5 и 8.5, опубликованные в открытом доступе (Казгидромет, 2018; Казгидромет, официальный сайт; ПРООН, 2016; Сводное ежегодное сообщение…, 2020; Седьмое национальное Сообщение…, 2020; Школьник и др., 2018; Guo, Xia, 2014; IPCC,

2013, 2014, 2019a, 2019b). Рассматривались четыре уровня подверженности изменениям климата: ситуация в дельте р. Или (местный), в Алматинской области (региональный), для территории Казахстана (страновой) и для бассейна р. Или в целом (международный). Последний в меньшей степени из-за отсутствия данных.

Методика гидрологических исследований и потенциала лесовосстановления

Для оценки потенциала лесовосстановления в дельте р. Или и его воздействия на гидрологическую обстановку проводился анализ влияния водорегулирующей функции дельты р. Или в зависимости от покрытия ее лесной растительностью на изменения речного стока и уровня оз. Балхаш. При этом учитывались многочисленные природные и антропоген-ные факторы. В работе использовались современные, а также исторические гидрометеорологические данные наблюдений гидрологических постов на р. Или. Гидрологические исследования включали в себя:

1) анализ внутригодовой и межгодовой изменчивости стока воды реки;

2) анализ воздействия на водный сток р. Или Капчагайского водохранилища;

3) исследования воздействия изменения климата на изменчивость речного стока и испарение с поверхности оз. Балхаш и Капчагайского водохранилища;

4) оценка степени заливания дельты во время половодья и паводков по данным дистанционного зондирования;

5) анализ зависимости водорегулирующей функции дельты от степени ее залесенности в условиях меняющегося климата.

Методика исследований ледников

Для определения границ современного оледенения, величины отступания ледников и изменения их площадей с 2000 по 2018 гг. в бассейне р. Или использовались спутниковые изображения высокого и среднего пространственного разрешения в свободном доступе: Sentinel-2 и Landsat-7.

Спутник дистанционного зондирования Landsat 7 осуществляет съемку, используя два набора сенсоров – Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Первый набор сенсоров предназначен для съемки в видимом, ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах спектра, второй – для съемки в тепловом диапазоне. Пространственное разрешение снимков: 30-100 м в зависимости от диапазона съёмки. Пространственное разрешение панхроматического канала (15 м) позволяет дешифрировать большинство встречающихся негативных процессов и нарушенных земель как в ручном, так и в автоматизированном режиме.

Наличие доступного архива космических снимков Landsat земного покрова за более чем тридцатилетний промежуток времени позволяет проводить более точное дешифрирование природных процессов и явлений в региональном масштабе (рис. 1).

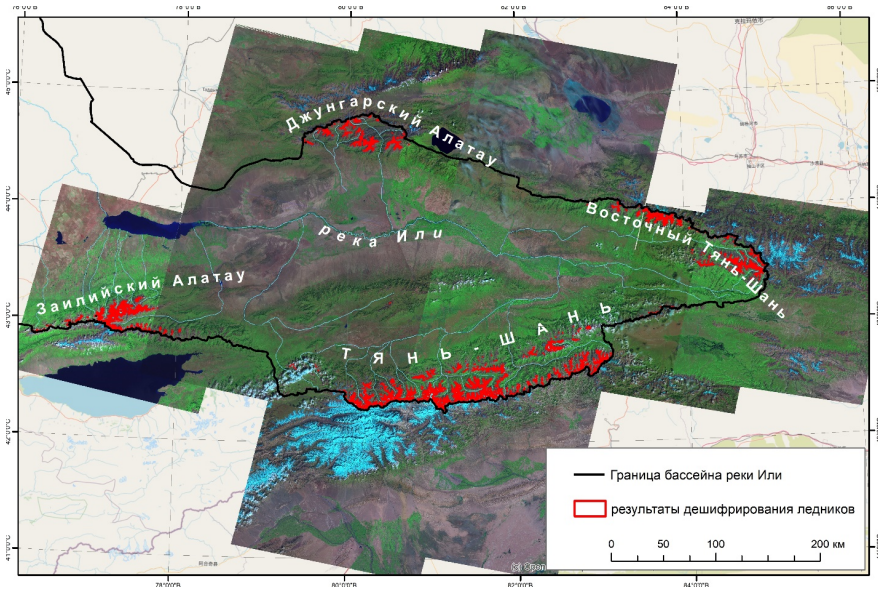

Рисунок 1. Рабочий проект с загруженными мозаиками космических снимков Landsat-7 за август 1999-2001 гг.
Синтез RGB снимков – 7:4:2 (SWIR: NIR: RED)

Sentinel-1 и Sentinel-2 – семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства (ESA), запущенные в 2013-2017 гг. в рамках проекта «Copernicus» – глобального мониторинга окружающей среды. Космические аппараты Sentinel-2A/2B оснащены оптико-электронным мультиспектральным сенсором (MultiSpectral Instrument – MSI), который выполняет съёмку в 13 спектральных каналах от видимого и ближнего инфракрасного до коротковолнового инфракрасного диапазона спектра.

Пространственное разрешение основных каналов (трёх видимых и ближнего инфракрасного) равняется 10 м, что в 1.5-3 раза выше, чем у Landsat. Сочетание относительно высокого пространственного и высокого спектрального разрешения, значительной полосы захвата (290 км) является уникальным преимуществом спутниковой системы Sentinel-2.

Помимо четырёх основных каналов, система Sentinel-2 включает в себя три канала среднего инфракрасного спектра разрешением 20 м, что позволяет синтезировать изображения в таком же спектре как у Landsat (SWIR-NIR-RED), делая ее тем самым оптимальной для дешифрирования ледников (рис. 2).

Векторизация границ ледников была выполнена методом визуального дешифрирования с использованием программы ArcGIS. Для корректного дешифрирования очень важно использовать снимки, выполненные в безоблачную погоду в конце периода абляции до начала выпадения нового снега. В районе исследования такой период приходится на август – начало сентября. Из-за недостатка качественных снимков за соответствующий сезон 2000 г., на некоторые участки ледников бассейна р. Или дешифрировались снимки Landsat за август 1999 и 2001 гг.

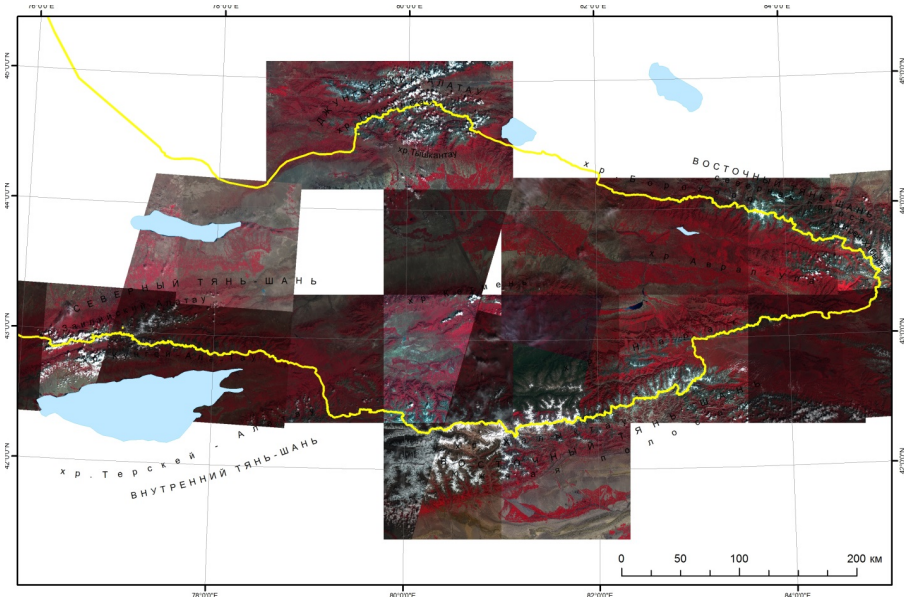

Рисунок 2. Рабочий проект с загруженными сценами космических снимков Sentinel-2 за 2018 год

Жёлтой линией обозначена граница бассейна р. Или

Снимки Sentinel на исследуемую территорию были отобраны по аналогичному принципу – на вторую половину августа, когда на ледниках присутствует минимальное количество снега. Участки горных районов, закрытые кучевыми облаками, заменялись другими сценами, например на конец июля. К сожалению, из-за летних снегопадов в горах, на практике не всегда удавалось подобрать бесснежные снимки. Поэтому некоторые границы ледников, особенно в верхних зонах, нуждаются в уточнении по данным других менее снежных лет.

Некоторые ледники могут заканчиваться заморенненой поверхностью, переходящей в каменные глетчеры и «мёртвые» погребённые льды. Эти ледники также нуждаются в уточнении площадей, и, возможно, в полевом обследовании.

Точность дешифрирования космических изображений в первую очередь зависит от пространственного разрешения снимков. Космические снимки Sentinel-2 имеют пространственное разрешение равное 10 м и 20 м (SWIR-канал), космические снимки Landsat, по которым дешифрировались ледники 2000 г., имеют пространственное разрешение 15 или 30 м (в зависимости от степени обработки). Так как снимки Sentinel-2 и Landsat имеют геометрическую коррекцию по цифровой модели рельефа, они имеют высокую степень совместимость между собой. Согласно проведённым исследованиям, точность привязки космического снимка Sentinel-2 в среднем равняется 10-15 м, а снимка Landsat разрешением 15 м – 15-20 м.

Методика выбора участков и методические требования при проведении лесовосстановления

При выборе на территории дельты р. Или площадей, на которых будет осуществляться лесовосстановление, решались следующие задачи:

1) по данным дистанционного зондирования определялись участки, абсолютно непригодные для посадок деревьев: водные объекты, переувлажненные или засоленные участки;

2) выбирались участки, занимающие нижнее и среднее положение в фитокатенах, достаточно выположенные, с относительно сомкнутым травянистым покровом или сохранившимися фрагментами древесно-кустарникового покрова;

3) оценивалась доступность территории: удаленность от дорожной сети, наличие ручьев, озер и проток, затрудняющих доступ, наличие водоема для искусственного полива.

Всю территорию дельты занимает водно-болотное угодье международного значения «Дельта р. Или и южная часть оз. Балхаш» (Information Sheet…, 2011; Ili River Delta…, 2012). В соответствии с законодательством Республики Казахстан в дельте были организованы: два заказника и Природный резерват «Иле-Балхаш», охватывающие большую часть ее территории. Посадки лесных культур на особо охраняемых природных территориях должны вестись с соблюдением ряда методических условий:

1) не допускается использование видов-интродуцентов;

2) минимизация механической обработки почвы при создании лесных посадок;

3) минимизация фактора беспокойства для млекопитающих и птиц;

4) крайне нежелательно нарушение гидрологического режима на территории водно-болотного угодья международного значения и запрещено на территории Иле-Балхашского резервата: нельзя прокладывать новые каналы для орошения или дренировать участки дельты, строить дамбы или мосты.

При анализе пригодности видов использовались следующие критерии:

1) встречаемость в аналогичных ненарушенных сообществах;

2) эффективность для адаптации, включая скорость роста, формирования крон деревьев и создания теневого полога;

3) расположение на разных уровнях в фитокатенах;

4) приживаемость саженцев/сеянцев;

5) минимальные сроки ухода и дополнительного полива после посадки;

6) возможность получения достаточного количества посадочного материала.

Результаты и обсуждение

Региональные проявления глобальных изменений климата

Современные изменения климата. Казахстан расположен в центре Евразии в засушливом климате с жарким летом: холодный аридный BWk и холодный семиаридный BSk по классификации Кёппена-Гейгера (Rubel, Kottek, 2010).

Большая часть территории относится к аридной (0.05-0.2) или семиаридной (0.2-0.5) области по значениям индекса аридности (рис. 3), принятом UNEP (1992):

$$AI = \frac{P}{PET},$$

где AI – индекс аридности UNEP, P – среднегодовое количество осадков, PET – потенциальная эвапотранспирация.

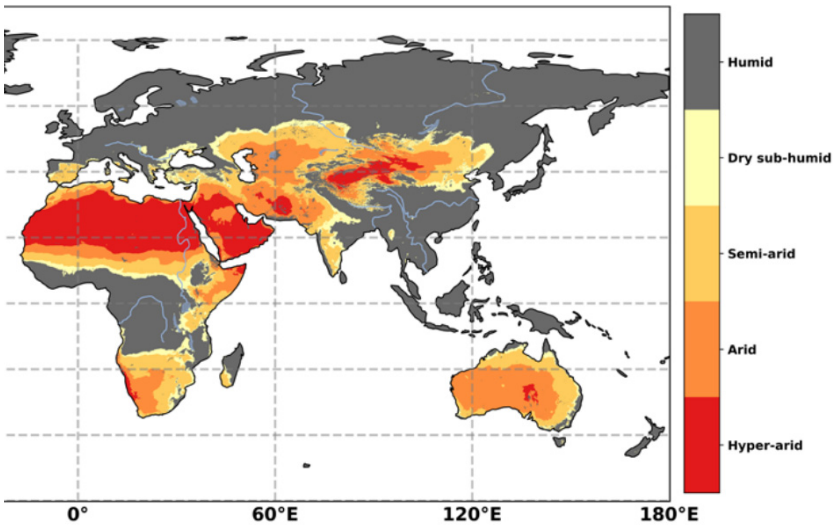

Рисунок 3. Географическое распределение засушливых земель на основе индекса аридности (ИА)
(IPCC, 2019a)
Подписи на рисунке: humid – влажный; dry sub-humid – сухой субгумидный, semi-arid – полузасушливый, arid – аридный (засушливый), hyper-arid – гипераридный (крайне засушливый); °E – градусы восточной долготы

Повышение среднегодовой температуры с 1941 г. зафиксировано на всей территории Казахстана. Рост температуры за период 1941-2015 гг. достигает 2°C (Седьмое национальное Сообщение…, 2017), а с 1976 по 2017 гг. он шел со скоростью 0.34°C/10 лет (Казгидромет, 2018). В западной части оз. Балхаш и Алматинской области темпы роста среднегодовой температуры за 1976-2019 гг. находятся в диапазоне 0.3-0.4°C/10 лет, а в восточной части потепление идет несколько медленнее – 0.2-0.3°C/10 лет. Из десяти самых теплых лет с 1936 г. девять приходятся на начало XXI века (Сводное ежегодное сообщение…, 2020). Наиболее активно растут осенние и весенние температуры, наименее сильно – летние (0.19°C/10 лет). Также отмечается рост суточных максимумов температуры, хотя и незначительный (Казгидромет, 2018), а для ряда областей (в том числе Алматинской) – увеличение количества дней с температурой воздуха выше 35°C. Одновременно увеличивается продолжительность волн тепла на всей территории страны (на 1-3 дня/10 лет) (Седьмое

национальное Сообщение…, 2017). В то же время количество дней с отрицательными температурами сокращается на 4-8 дней/10 лет, а дней с жесткими морозами (ниже -20°С) – на 1-3 дня/10 лет (Казгидромет, 2018). Повышение зимних температур является, возможно, благоприятным фактором, но рост максимальных температур и волн тепла – отрицательным для здоровья населения, сельского хозяйства, водообеспеченности региона. Следствием роста температуры может являться усиление опустынивания на значительных территориях и сокращение биологического разнообразия.

В отличие от температуры воздуха, изменение режима атмосферных осадков в последние десятилетия носит неоднозначный характер. Оно накладывается на значительную межгодовую и межсезонную изменчивость. Например, в 2017 г. дефицит количества осадков (в % от климатической нормы) летом составил от 2% (июнь) до 40% (июль), тогда как в феврале и октябре количество осадков превысило климатическую норму на 28%, в апреле на 22% (Казгидромет, 2018).

В 1976-2017 гг. в среднем по Казахстану наблюдается слабый тренд увеличе-ния количества осадков на 5.9 мм/10 лет во все сезоны года, кроме осени (идет уменьшение осадков в среднем на 1.3 мм/10 лет) (Казгидромет, 2018). Географическое распределение динамики осадков также неоднородно: в ряде областей идет незначительное их сокращение, а в других, в частности, в Алматинской области – слабый рост. При этом значения максимального суточного количества осадков практически не изменились, а максимальная продолжительность периодов без осадков имеет незначительный тренд к сокращению (Седьмое национальное Сообщение…, 2017; Казгидромет, 2018), что является положительным фактором для сельского хозяйства и водообеспеченности. Общая тенденция увеличения количества осадков и повышения температуры характерна и для китайской части Или-Балхашского бассейна с 1940 г. (Guo, Xia, 2014).

Среднее годовое количество осадков, выпадающих на поверхность дельты р. Или, не превышает 200 мм (ПРООН, 2016). Для дельты реки характерна высокая величина испарения (от 500 мм с поверхности суходолов до 1080 мм с водной поверхности водотоков и водоемов и 1550 мм с полупогруженных тростниковых зарослей). Индекс сухости, равный отношению величины испаряемости (E_0 = 1100 мм) к осадкам (P = 150 мм), E_0/P составляет 7.33 и указывает на высокую степень засушливости территории устьевой области р. Или, характерную для пустынь (Атлас…, 1974; Михайлов, 1997). Наличие же постоянного стока воды в водотоках дельты, его распределение и перераспределение по элементам гидрографической сети дельты, обводнение межрусловых участков, большое число небольших озер и затонов делает дельту р. Или азональным географическим объектом – оазисом посреди пустыни.

Усиление суровости климата в Прибалхашском районе, связанной с повышением температуры воздуха (в том числе максимальной) и учащением волн тепла, приводит к увеличению количества опасных метеорологических явлений. За период с 1990 по 2015 гг. в целом по стране было зафиксировано 3840

случаев опасных явлений, т.е. в среднем около 150 в год, причем прослеживается тенденция к увеличению их количества. В холодный период отмечаются следующие опасные метеорологические явления: сильные снегопады и метели, сильный ветер (до ураганного), сильные продолжительные морозы, гололедно-изморозевые явления, поздние весенние заморозки; в теплый период: сильные ливни, в том числе с грозами, градом и сильным ветром, волны тепла, засухи, высокая пожарная опасность. В Прибалхашье также возможны сильная пыльные (песчаные) бури, продолжительностью 12 ч и более, при средней скорости ветра ≥15 м/с (Седьмое национальное Сообщение…, 2017). Причем максимальное количество дней с пыльными бурями фиксируется именно в дельте р. Или, в районе вдоль русла реки (рис. 4).

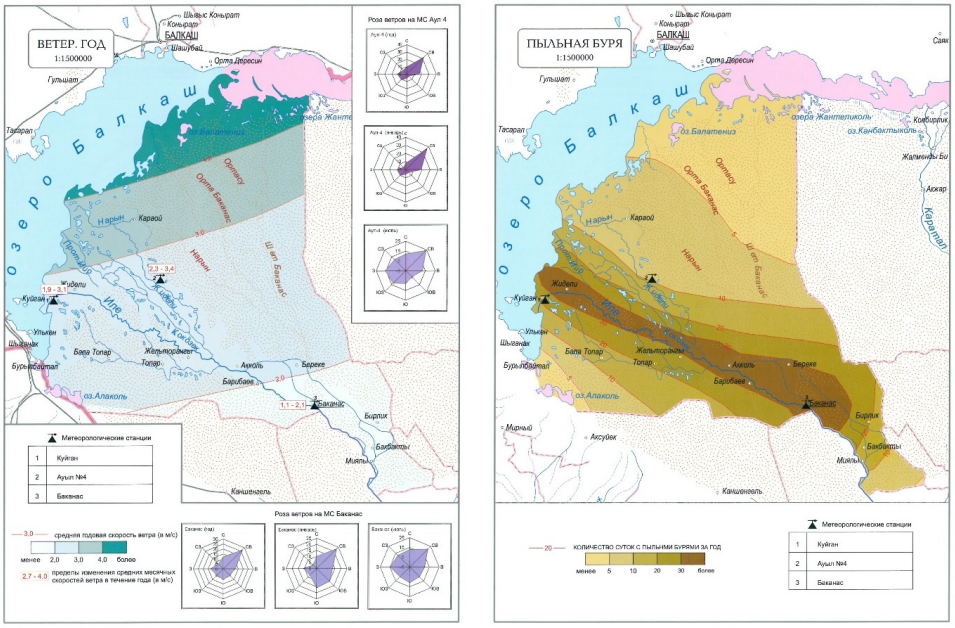

Рисунок 4. Средняя скорость ветра, его направление и число дней с пыльными бурями в дельте р. Или
(ПРООН, 2016)

Алматинская область лидирует по количеству опасных метеорологических явлений в стране, причем в период 2003-2015 гг., по сравнению с периодом 1990-2002 гг., среднее годовое число случаев с сильным дождем увеличилось в 3.9 раза, с сильным снегом – в 3.3 раза, с сильным ветром – в 1.6 раза (Седьмое национальное Сообщение…, 2017). В 2019 г. повторяемость сильного ветра и сильного дождя в Казахстане составила 62% от всех экстремальных метеорологических явлений, причем в 19 случаев из 22 сильные дожди выпадали именно в Алматинской области. 9 случаев сильного ветра из 31 по стране также имели место в этой области, что больше, чем в любой другой области Казахстана за год (Сводное ежегодное сообщение…, 2020).

Опасные гидрологические явления учитываются в Казахстане отдельно от метеорологических. Наиболее часто случаются паводки на горных реках –

45% от общего количества, наводнения на равнинных реках – 26%, сели – 10%, заторы льда на реках – 9%, экстремальное маловодье – 9%. Можно говорить, что увеличение количества опасных гидрологических явлений проявляется более ярко, чем для метеорологических: в период 1991-2015 гг. годы по сравнению с периодом 1967-1990 гг. число паводков на горных реках, заторных явлений, селей и маловодий возросло почти в два раза, а число наводнений на равнинных реках сократилось примерно на 8% (Седьмое национальное Сообщение…, 2017). Всего в Казахстане в зонах возможного подтопления находятся 1055 населенных пунктов, в которых проживают около 966 тыс. человек (Сводное ежегодное сообщение…, 2020). Вновь по количеству стихийных бедствий лидирует Алматинская область: 84 случая из 334 в целом по стране с 1967 по 2015 гг., среди которых наиболее высока повторяе-мость – высоких паводков (в том числе в дельте р. Или) и селей (Седьмое национальное Сообщение…, 2017). 3 мая 2019 г. в г. Балкаш было отмечено беспрецедентное событие: за 5 часов выпало 66 мм осадков при месячной норме 15 мм (Сводное ежегодное сообщение…, 2020).

Ледники, питающие р. Или в верховьях, постепенно сокращаются, как и во всем регионе, медленнее, чем на Кавказе, но быстрее, чем в Гималаях (IPCC, 2019b).

Таким образом, изменения климата на территории Казахстана, в том числе – в Прибалхашье и дельте р. Или уже проявились достаточно отчетливо, в том числе в виде усиления аридизации климата. Из экстремальных погодных явлений имеют тенденцию к усилению: максимальные температуры, волны тепла, засухи, пыльные бури, экстремальные осадки и наводнения.

Прогноз изменений климата. Для всех выбранных сценариев изменения климата (от RCP 2.6 до RCP 8.5) прогнозируется, что повышение температуры в Центральной Азии будет продолжаться, но с разной скоростью. Ситуация с осадками более сложная, но даже при некотором увеличении их количества им будет трудно скомпенсировать рост температуры и как следствие – испаряемости в и без того засушливом климате (МГЭИК, 2013, 2014).

В Седьмом национальном Сообщении (2017) приводятся результаты прогнозов изменений климата на основе расчетов с помощью глобальных климатических моделей CMIP5 на основе ансамбля из 21 одной модели по двум сценариям (RCP 4.5 и 8.5) для четырех временных срезов (2030-х, 2050-х, 2070-х и 2090-х гг. относительно базового периода 1980-1999 гг.).

Для сценария RCP4.5, прогнозируемое изменение среднегодовой температуры воздуха к 2030 г. составит 1.5…1.7°C, а к концу можно ожидать повышения более, чем на 3°C. При реализации сценария RCP8.5 к концу века повышение температуры может достигнуть 6.0°C (6.1°C летом) (Седьмое национальное Сообщение…, 2017), что будет иметь тяжелые последствия для сельского хозяйства и здоровья населения.

Расчет, проведенный Главной геофизической обсерваторией (ГГО) на основе региональной модели для Центральной Азии и сценария RCP8.5, показал, что ожидается повышение температуры к югу от оз. Балхаш на 2-2.6°C к 2055 г. по сравнению с 1995 г. (Школьник и др., 2018).

Изменение осадков в XXI веке различается в зависимости от выбранных климатических сценариев. Если при умеренном сценарии RCP4.5 ожидается нарастающий рост количества осадков во все сезоны до 13.21 мм в год (7.99 мм летом), то при RCP8.5 при общем среднегодовом росте (11.77 мм) количество осадков летом с середины века начинает сокращаться от -0.43 до -2.07 мм в конце века, при увеличении зимних осадков до 32 мм (Седьмое национальное Сообщение…, 2017). В любом случае, рост летних осадков не способен скомпенсировать нарастающую засушливость климата из-за повышения температур. При реализации сценария RCP8.5 ситуация становится особенно тяжелой, т.к. возможно усиление и распространение процессов опустынивания.

По данным ГГО к 2055 г. южнее оз. Балхаш количество осадков может увеличиться на 20-24% по сравнению с 1995 г., однако при этом отмечается значительный диапазон внутриансамблевого разброса (27-36%) оценок будущих изменений осадков, что указывает на значительную неопределенность прогноза, вплоть до возможного сокращения количества осадков в регионе к середине века на фоне глобального потепления (Школьник и др., 2018).

Опасные метеорологические явления труднее поддаются прогнозированию. Тем не менее, в Седьмом Национальном сообщении (2017) отмечается, что ожидается увеличение температурных максимумов, повторяемости и продолжительности волн тепла, причем другие опасные явления также будут проявляться. Повышение температуры воздуха для рек, берущих начало в горах, как р. Или, означает дальнейшую деградацию ледников, повышение границы выпадения жидких осадков, усиление селевой активности, увеличение повторяемости высоких паводков. В дальнейшем тенденция может измениться в связи с деградацией ледников. В Прибалхашье, несмотря на общую тенденцию уменьшения средней скорости ветра, количество дней с пыльными/песчаными бурями может увеличиться из-за общего иссушения территории. При снижении уровня оз. Балхаш ниже 341 м БС, когда происходит его значительное обмеление и распад на две части, риск повторяемости пыльных бурь также существенно возрастает (Седьмое национальное Сообщение…, 2017).

Анализируя социально-экономические особенности развития региона, специалисты Казгидромета пришли к следующим выводам: в перспективе ожидается дальнейший рост численности населения и увеличение объемов сельскохозяйственной продукции на территории Или-Балхашского бассейна, как в Китае, так и в Казахстане, что может привести к дефициту водных ресурсов. Важной особенностью бассейна является необходимость расходования почти половины ресурсов речного стока на поддержание уровня и солености оз. Балхаш, а также на обводнение природных систем речных пойм и дельт. Процесс изменения климата происходит настолько быстро, что природные экосистемы не успевают адаптироваться к этим изменениям, что ведет к сокращению биоразнообразия. Изменение климата изменит характер функционирования экосистем и их способность оказывать те услуги, от которых зависит общество. Одной из крупнейших природных экологических систем на территории Казахстана, где необходимо срочно применять адаптационные

программы в водном и экосистемном секторах, является дельта р. Или вместе с оз. Балхаш (Седьмое национальное Сообщение…, 2017).

Гидрологические процессы и потенциал лесовосстановления

Гидрографическая характеристика устьевой области р. Или. Устьевая область р. Или (рис. 5) включает обширную дельту площадью по разным данным от 8200 (Михайлов, 1997) до 9750 км^2 (Стародубцев, Трускавецкий, 2011) и устьевое взморье. Современная дельта р. Или имеет форму треугольника с вершиной, расположенной в 120 км от оз. Балхаш в месте отделения от реки влево рукава Топар-I (вершина дельты ВД), и основанием вдоль берега озера. Южная граница дельты проходит вдоль левобережных водотоков и водоёмов системы рук. Топар, а северная (и северо-восточная) – вдоль правобережных водотоков и водоёмов системы рукава Жидели. Длина аккумулятивного изрезанного озерного края дельты ~200 км. Дельта Или имеет несколько постоянных рукавов – Или (Иле), Топар, Жидели, Иир, Нарын. Севернее и северо-восточнее современной находится территория древней «сухой» дельты Или (~10 тыс. км^2) (Михайлов, 1997) − территория песчаной пустыни Сарыесик Атырау (Сары-Ишик-Отрау), покрытой грядовыми эоловыми формами рельефа, которые пересекаются сухими древними руслами дельты, так называемыми «баканасами».

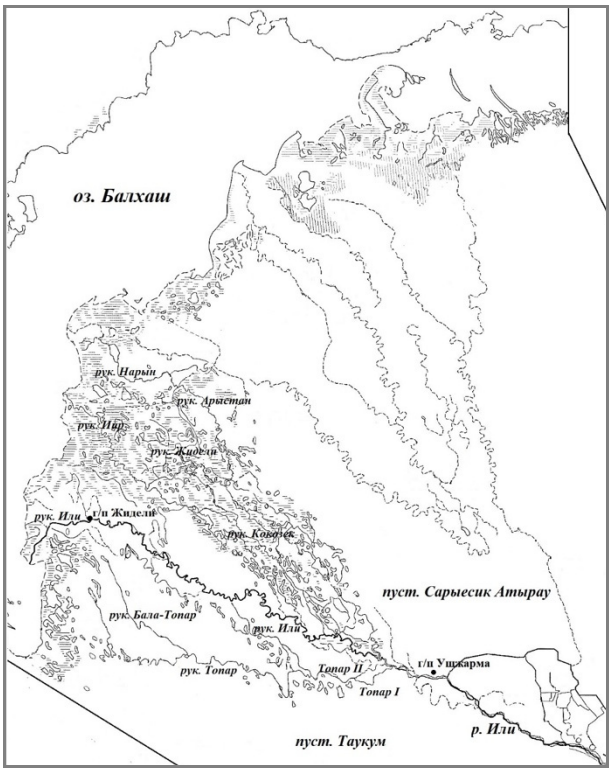

Рисунок 5. Карта-схема устьевой области р. Или
(Isupova, 2019)

Сток воды в дельте осуществляется по трем основным системам рукавов – это центральная система рук. Или, правая система Жидели и левая система Топара. В центральной системе сток воды сосредоточен в извилистом русле рук. Или (Иле), имеющем единственный выход в приемный водоем. В южную систему рук. Топар вода поступает по коротким протокам Топар-I и Топар-II, далее распределяясь между рук. Топар и протоком Бала-Топар. Постоянного стока воды из системы рук. Топар в оз. Балхаш нет. Правая система рук. Жидели включает постоянные протоки Жидели, Кокозек (Кугалы), Иир (Ир), Арыстан, Нарын, а также многочисленные озера. В этой системе сосредоточены основной сток р. Или и гидроморфные ландшафты. Система Жидели имеет 12 непосредственных выходов в оз. Балхаш: четыре выхода в подсистеме протока Иир, включающей трехрукавную локальную дельту, семь устьев протоков в локальной дельте рук. Жидели и один в устье протока Нарын.

Озера в дельте р. Или (в основном старичные) образуют пять систем – Изендинскую, Семизкульскую (устьевые зоны систем рукавов Топар и Или), Кугалы-Ирскую (нижняя часть системы рук. Жидели), Наурузбаевскую (устье рук. Жидели) и Нарынскую (устье протока Нарын). По данным В.Н. Михайлова, (1997) в 1960-х гг. в дельте Или насчитывалось 9513 озер общей площадью 679 км^2. В работе (Стародубцев, Трускавецкий, 2011) отмечено, что с середины 1980-х гг. по настоящее время площадь озер уменьшилась с 1200 до 200 км^2.

Многолетние и внутригодовые изменения стока воды в вершине дельты (ВД) р. Или. Основная часть бассейна р. Или находится в области засушливого климата. Питание реки происходит за счет сезонных снегозапасов и горных ледников (в сумме ~60%), грунтовых (~30%) и дождевых вод (10%). Для водного режима р. Или характерно наличие весенне-летнего половодья, начинающегося в естественных условиях в апреле-мае и продолжающегося до середины июня. Второй пик расходов воды, превышающий первый, наблюдается в июле-августе (волна ледникового паводка). С сентября по март река маловодна.

Среднемноголетний расход воды $Q_{ср}$ р. Или на г/п Ушжарма (Учжарма) (30 км выше ВД и в 150 км от устья) составляет от 434 м^3/с (сток воды 13.7 км^3/год) за 1975-2015 гг. (Абдрахимов, Амиргалиева, 2018) до 479 м^3/с (13.5 км^3/год) за 1937-1987 гг. (Михайлов, 1997). С учетом водосброса из Акдалинского массива орошения, расположенного выше ВД Или, сток воды в ВД складывается из его величины на г/п Ушжарма (13.7 км^3/год) и сброса из оросительного массива (0.274 км^3/год), что составляет ~14.0 км^3/год (Isupova, 2019).

В условиях естественного водного режима устьевой области р. Или (до 1970 г.) на многоводный период приходилось до 64% годового стока реки, а максимальный расход воды по данным за 1937-1969 гг. составлял ~1300-1500 м^3/с. В результате зарегулирования реки (1965-1970 гг.) и многолетнего изъятия вод на орошение из Капчагайского вдхр., а также изъятия речных вод в Акдалинский массив поступление воды в дельту р. Или уменьшилось на 2-

4 км^3/год. Изменилось также и внутригодовое распределение стока воды выше ВД (рис. 6). Зарегистрированный повышенный сток в ноябре 1996 г. (рис. 6б) – исключение, не характерное для водного режима р. Или и ее дельты.

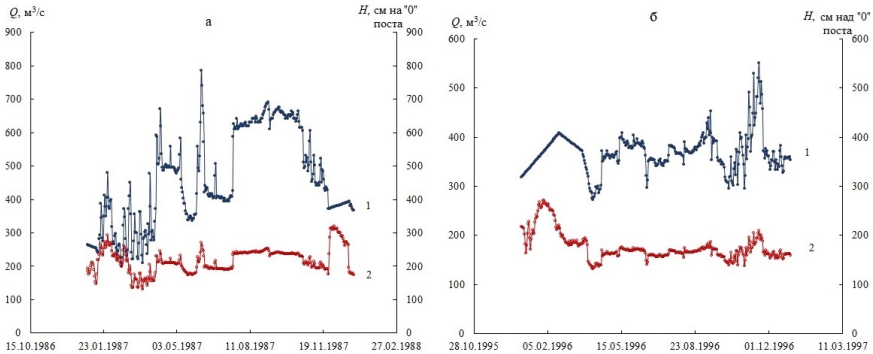

Рисунок 6. Гидрографы расхода (1) и уровня (2) воды р. Или на г/п Ушжарма (Учжарма) за 1987 (а) и 1996 гг. (б)
(Isupova, 2019)

В среднем в результате зарегулирования реки сток воды р. Или в ВД сокра-тился на 2-3% ежемесячно (октябрь-май). Водный сток за июль снизился с 16.4 до 10.0% годового, а августа – с 15.9 до 9.6% годового стока. Среднеме-сячный расход воды в дельте в летние месяцы уменьшился с 1000 до 400- 500 м^3/с (при экстренных попусках – до 600 м^3/с), а уровни воды в дельте на пике паводка (половодья) снизились на 1.0-1.5 м. (Isupova, 2019). Средние же минимальные расходы воды в зимний период и период открытой воды воз-росли с 133-148 до 250-280 м^3/с. В последние годы наблюдается уменьшение обводнения дельты, несмотря на усиление дополнительного притока вслед-ствие таяния ледников. Также снизились уровни грунтовых вод в дельте – на 3.0-3.5 м в верхней части дельты и на 1.0 м в средней. В зимнюю межень уменьшилось количество заторно-зажорных явлений, которые ранее способ-ствовали дополнительному обводнению дельты.

Потери стока в дельте р. Или. Значительная часть стока р. Или теряется на инфильтрацию, испарение и транспирацию в дельте, расположенной в зоне недостаточного увлажнения. До 1970-х годов средние многолетние потери стока на испарение в дельте составляли ~3.82-3.86 км^3/год (Михай-лов, 1997). В 1970-1987 гг. в условиях зарегулирования стока р. Или суммар-ные потери стока в дельте уменьшились до 3.1-3.2 км^3/год, а сток р. Или в оз. Балхаш сократился на 3.1 км^3/год (Михайлов, 1997). За 2000−2009 гг. по данным (Попова и др., 2010) потери стока в дельте оцениваются в среднем в 4.54 км^3/год при величине стока р. Или в этот период 16.3 км^3/год.

Распределение и перераспределение стока воды между рукавами дельты р. Или. В настоящее время практически весь сток р. Или в вершине дельты (до 96-98%) сосредоточен в самой молодой и активизирующейся системе рук. Жидели. По данным (Абдрахимов, Амиргалиева, 2018) величина $Q_{ср}$

рук. Жидели в 16 км ниже его истока за 1976-2015 гг. составляет 425 м^3/с (13.4 км^3/год). Система питает большое количество водотоков, озер и болотных массивов.

В системе центрального рук. Или (самой древней), в настоящее время отмирающей, сток воды существенно снизился. К 1984-1987 гг. доля стока этого рукава составила только 3% стока в вершине дельты. Среднемноголетний расход воды рук. Или ниже отделения от него рук. Жидели составил 18.1 м^3/с (0.57 км3/год) за 1975-2015 гг., а в районе г/п Жидели – 11.4 м^3/с (0.36 км^3/год). Система рукава Топар, сформировавшаяся в середине XIX в., в настоящее время также отмирает, а водный сток в ней поддерживается искусственно. Доля стока этой системы сократилась до 1% в 1984-1987 гг., что привело к высыханию большинства озер этой системы.

Заливание дельты р. Или в период повышенного стока. В период половодья происходит заливание дельты р. Или. Это периодический процесс, возникающий при превышении уровней воды в рукавах критических отметок и дальнейшем выходе воды на пойму и заполнении водой дельтовых понижений рельефа. Сезонное медленное заливание дельты способствует увлажнению почвы, развитию растительности, обводнению нерестилищ, увеличению запасов грунтовых вод.

Площадь водной поверхности в дельте р. Или и дельтовых озер составляет 219+200 = 419 км^2 (5.1% общей площади дельты, принятой равной 8200 км^2). В период повышенного стока р. Или (в половодье или крупные попуски) территория дельты, занятая водой, существенно увеличивается. Расчеты площадей открытой водной поверхности дельты р. Или в разные даты 2018 г., проведенные А.А. Алейниковым, позволили приблизительно оценить степень заливания дельты в течение года (Isupova, 2019). Так в весеннюю часть половодья (первая значительная волна попусков из Капчагайского вдхр.) под водой оказались от 1146 до 1519 км^2 территории дельты (14-18.5% площади дельты). К концу первой декады июля площадь заливания уменьшилась до 997 км^2 и вновь возросла во второй декаде августа до 1161 км^2 (14.2%) (летняя часть половодья и вторая волна попусков) (рис. 7). К началу ноября вода спала и площадь водной поверхности в дельте уменьшилась до 869 км^2. По данным официального сайта Казгидромета, в 2018 г. весеннее половодье было довольно ранним (первая его волна прошла в марте), что объясняет такие большие площади поверхности дельты, занятой водой, в апреле-мае.

С учетом того, что площадь дельты, постоянно занятая водой, составляет примерно 419 км^2, площадь заливания дельты в 2018 г. в период весеннего половодья достигала 727-1100 км^2 (8.9-13.4% площади дельты), в период летнего половодья – 578-742 км^2 (7.0-9.0%), осенью – 450 км^2 (5.5%) (Isupova, 2019). В целом, в многоводный период года площадь заливания в дельте – >13% площади всей дельты, при этом наибольшее заливание дельты наблюдаются в наиболее обводненной системе рук. Жидели.

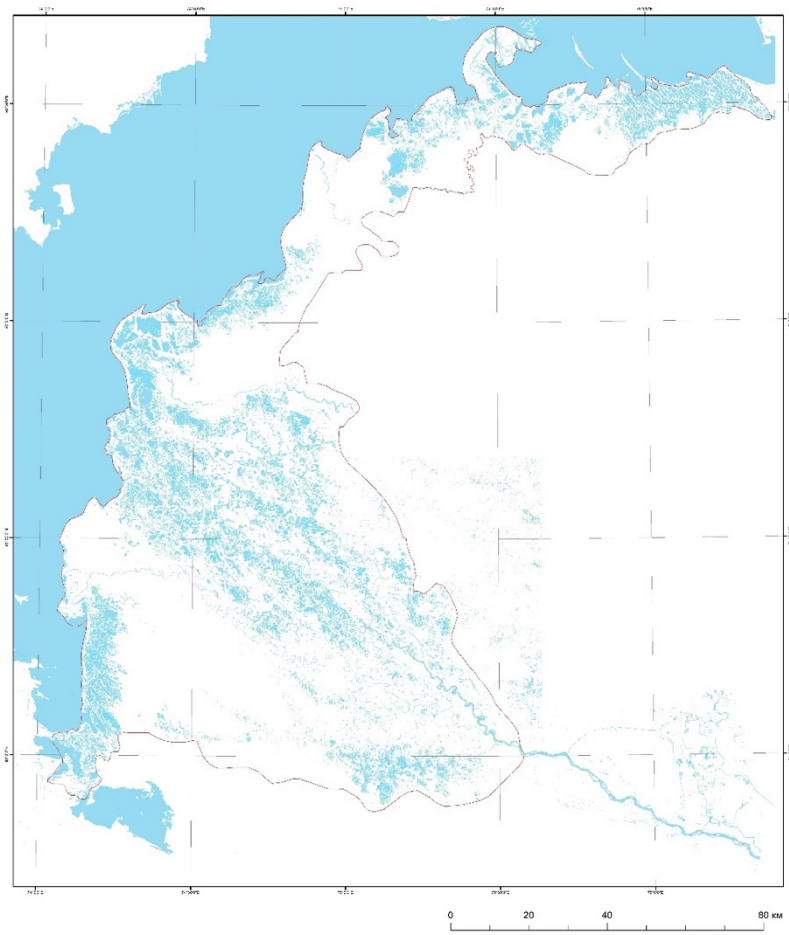

Рисунок 7. Пространственное заливание дельты р. Или по данным космического снимка от 17.08.2018 г.

Влияние восстановления лесов на регулирующую роль дельты р. Или. Восстановление тугайных лесов на некоторых участках в дельте р. Или, по-видимому, приведет к неоднозначной реакции водотоков дельты. С одной стороны, возрастет увлажненность участков дельты вследствие изменения микроклимата – затенение листвой крон деревьев будет предохранять почву от перегрева и пересыхания в летний период. С другой стороны, увеличится суммарное испарение в дельте в результате возрастания транспирации и испарения воды с кроны деревьев. В то же время восстановленные тугайные леса усилят регулирующую роль дельты р. Или. Согласно данным В.Н. Михайлова (2005), корневая система деревьев будет способствовать увеличению водопроницаемости почв дельты и дополнительному питанию грунтовых вод (запас которых в дельте после зарегулирования стока сократился). В многоводный период года древесная растительность в дельтовой пойме усилит инфильтрацию воды в почвогрунты, в том числе за счет снижения поверх-

ностного стока, а также будет способствовать «задержанию» речной воды в понижениях дельтового рельефа. В маловодный же период, при котором питание реки осуществляется главным образом за счет подземных вод, дельта будет «отдавать» накопленную воду в рукава, озера или непосредственно в оз. Балхаш с плоскостным потоком. Следовательно, чем больше площадь участков дельты, покрытых лесами, тем больше дельта способна накопить воды во влажный сезон (половодье, паводок, многоводный год), а затем отдать в сухой сезон (межень или даже в засушливый год). С учетом того, что увеличение залесенности водосбора (или дельты) может привести к росту подземной составляющей питания реки на 30-70% (Михайлов и др., 2005), грунтовое питание рукавов дельты р. Или может увеличиться на 1.26-2.94 км^3/год (до 21% годового стока реки), что, в свою очередь, приведет к дополнительному поступлению воды в оз. Балхаш.

Кроме того, восстановление тугайных лесов существенно снизит склоновую и береговую эрозию в дельте р. Или (Снытко и др., 1989). Таким образом леса смогут предохранить берега водотоков дельты р. Или от разрушения, будут способствовать аккумуляции песчаного аллювия в дельтовой пойме и предотвращению заиления русел водотоков.

Динамика ледников

В бассейне р. Или находятся четыре крупных очага оледенения (рис. 8): на севере – горная система Джунгарский Алатау (ледники южного склона хребтов Токсанбай и Тышкантау, Казахстан, Китай); на востоке – северная полоса Восточного Тянь-Шаня (ледники южного склоны хребтов Бороторо, Ирен-Хабырга и Аврал-Ула, Китай); на юге – южная плоса Восточного Тянь-Шаня (оледенение севеного склона хребтов Халыктау и Нарат, Китай, а также оледенение восточной оконечности хребта Терскей Алатау, Казахстан); на западе – горы Севеного Тянь-Шаня (оледенение северного склона хребтов Заилийский Алатау и Кунгей-Алатау, Казахстан).

Ледники Джунгарского Алатау, Восточного Тянь-Шаня, которые принадлежат бассейну р. Или, имеют преимущественно южную экспозицию, тогда как ледники Большого Тянь-Шаня и Заилийского Алатау – северную, что влияет на изначальные площади оледенения и интенсивность таяния за рассматриваемый период.

Согласно данным Долгушина и Осиповой (1989) в бассейне р. Или в середине 80-х годов XX века насчитывалось 2373 ледника общей площадью 2022.7 км^2. В результате дешифрирования космических снимков Sentinel-2 2018 года мы получили увеличение количества ледников до 2 648, но при этом общая площадь сократилась на 7.47% относительно 2000 года и на 10.02% с 1980-х годов (табл. 1).

Распределение ледников по площадям на 2018 г. для всего бассейна р. Или представлено на рис. 9.

Модельные прогнозы изменения климата указывают на продолжение современных трендов потепления, или даже их усиление при сценарии

RCP 8.5 (IPCC, 2013). В таких условиях сокращение ледников продолжится. В первую очередь будут исчезать ледники, имеющие площадь менее 0.5 км^2.

На рис. 9 красным и оранжевым цветом выделены ледники, которые в 2018 г. имели площадь менее 0.25 и 0.5 км^2 соответственно, т.е. которые исчезнут при любом сценарии изменения климата. Будет продолжать уменьшаться и площадь более крупных ледников, которые имеют площадь свыше 0.5 км^2 (табл. 2).

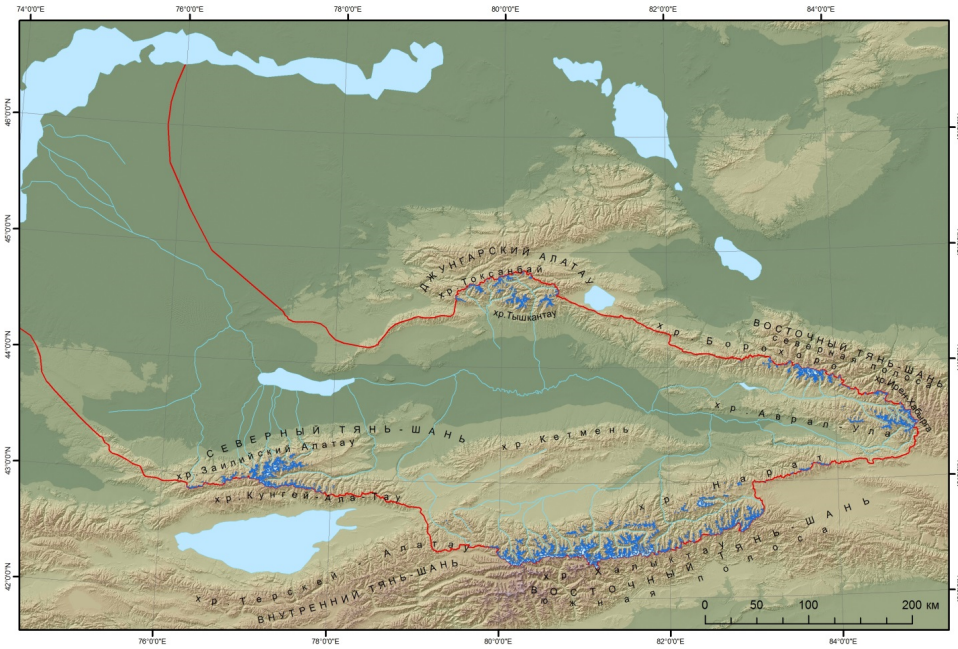

Рисунок 8. Общая схема оледенения. Красной линией отмечена граница бассейна р. Или *Синим цветом обозначены контуры ледников в 2018 г.*

Таблица 1. Площадь ледников по разным оценкам и ее сокращение

Год оценки	Общая площадь, км^2	Источник	Год сравнения	Сокращение площади в %
1980-е	2022.7	Долгушин, Осипова, 1989	-	-
2000	1967	Данная работа (по снимкам Landsat-7)	1980	2.75
2018	1820	Данная работа (по снимкам Sentinel-2)	1980	10.02
			2000	7.47

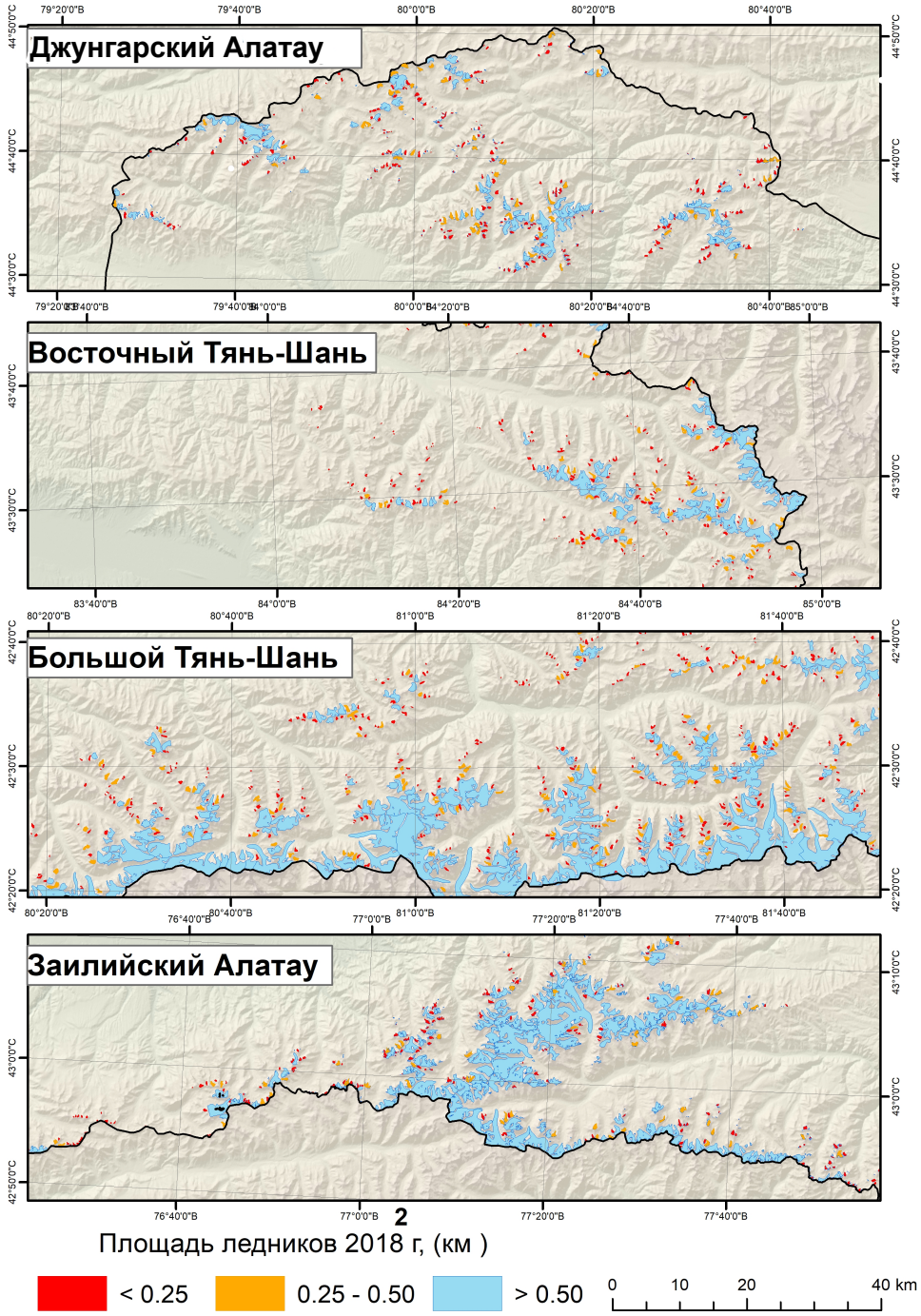

Рисунок 9. Современное оледенение бассейна р. Или и распределение ледников по площадям

Таблица 2. Современное оледенение бассейна р. Или и сокращение площади ледников с 2000 г.

Район	2018 г.			2000 г.			2000-2018 гг.
	Кол-во ледников	Общая площадь, (км^2)	Средняя площадь ледника, (км^2)	Кол-во ледников	Общая площадь, (км^2)	Средняя площадь ледника, (км^2)	Уменьшение общей площади оледенения, (%)
Джунгарский Алатау	372	121.2	0.33	385	137.8	0.35	13.70
Восточн. Тянь-Шань	510	291.4	1.24	527	319.28	0.65	9.76
Большой Тянь-Шань	1 354	1 068.1	0.79	1 370	1 151.5	0.84	7.81
Заилийский Алатау	412	339.1	0.82	420	358.5	0.85	5.73
Все ледники	2 648	1 820	0.795	2 702	1 967	0.67	7.47

Однако в бассейне р. Или, особенно в его китайской части, имеется достаточное количество крупных ледников, которые смогут поддерживать сток р. Или еще длительное время.

Пригодность территории для лесовосстановления

На основе данных дистанционного зондирования была выделена территория, которая после строительства и наполнения Капчагайского водохранилища продолжает функционировать как дельта. Кроме того, северная часть старой дельты продолжает заливаться во время подъемов уровня оз. Балхаш, что позволило включить ее в зону потенциального лесовосстановления (рис. 10).

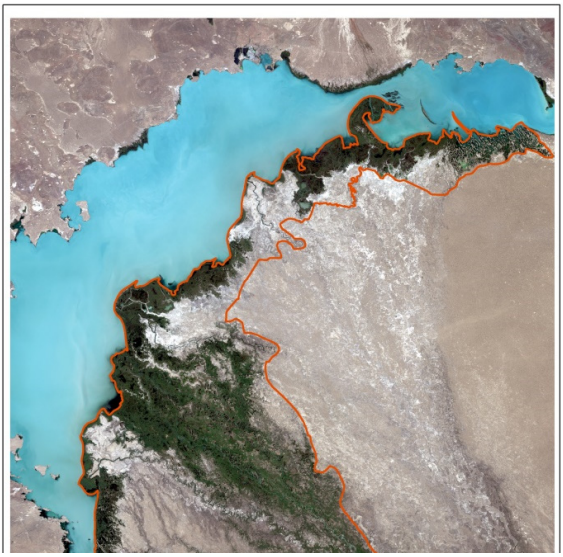

Рисунок 10. Территория, на которой предполагается проводить лесовосстановление

Также в результате дешифрирования снимков было установлено, что только 5% дельты р. Или до сих покрыты лесами, а остальная незатопляемая часть была преобразована в лугопастбищные угодья. Невозможно установить какая часть дельты была покрыта лесами до начала ее активного освоения и выжигания лесов, но на основании расположения и структуры сохранившихся лесов можно предположить, что большая. По оценкам специалистов, изучавших экологические процессы на примере многих десятков и сотен речных бассейнов, для достаточно эффективной водорегулирующей функции не менее 30% от экосистем дельты должны быть залесены (FAO, UNECE, 2018).

На территории дельты представлены три основных типа тугайных лесов:

– ивовые из ив джунгарской (*Salix songarica*), Вильгельмса (*S. wilhelmsiana*) и белой (*S. alba*) с участием лоха восточного (*Elaeagnus orientalis*);

– лоховые, в которых лох восточный (*Elaeagnus orientalis*) резко доминирует, а доля иных видов невелика;

– туранговые, с преобладанием двух видов тополя-туранги (широко распространенного *Populus diversifolia* и более редкого, занесенного в Красную книгу, *P. pruinosa*).

Если ивовые тугайные леса занимают в экосистемах узкие полосы вдоль рек или озёр с наиболее влажной средой обитания (около 10% площади), то туранговые занимают земли с лучшими почвами и средними условиями увлажнения – около 40% площади. Лоховые леса являются наименее требовательными к условиям почвенных характеристик и наиболее распространенными. Они могут расти на слегка засоленных почвах и в наиболее засушливых типах местообитаний – т.е. занимать около 50% пригодных площадей.

Специалистами Центра дистанционного зондирования и ГИС «Терра» были проведены анализы космических снимков среднего разрешения для предварительного выделения мест, пригодных для лесовосстановления. Им удалось выделить совокупно менее 150 тыс. га по предложенным критериям, причем мозаичность участков оказалась высокой (рис. 11).

Дальнейшие полевые исследования в 2018-2019 гг. показали, что пригодных для лесовосстановления участков больше, т.е. будет возможно выделить необходимые 200 тыс. га.

Следующая трудность возникла при рассмотрении возможностей создания посадочного материала. Ива белая и лох способны успешно размножаться черенкованием, что позволяет заготовить посадочный материал на месте или закупить. Однако наиболее ценная порода – туранга в естественных условиях лучше всего размножается корневыми отпрысками, тогда как приживаемость черенков весьма невысока. Опыт размножения семенами ПРООН (2016) также показал низкую эффективность из-за неудовлетворительной всхожести семенного материала. Тем не менее, предложение использовать вид-интродуцент тополь евфратский (*Populus euphrática)* было отклонено, т.к. это противоречит задачам сохранения водно-болотного угодья международного значения и Иле-Балхашского резервата.

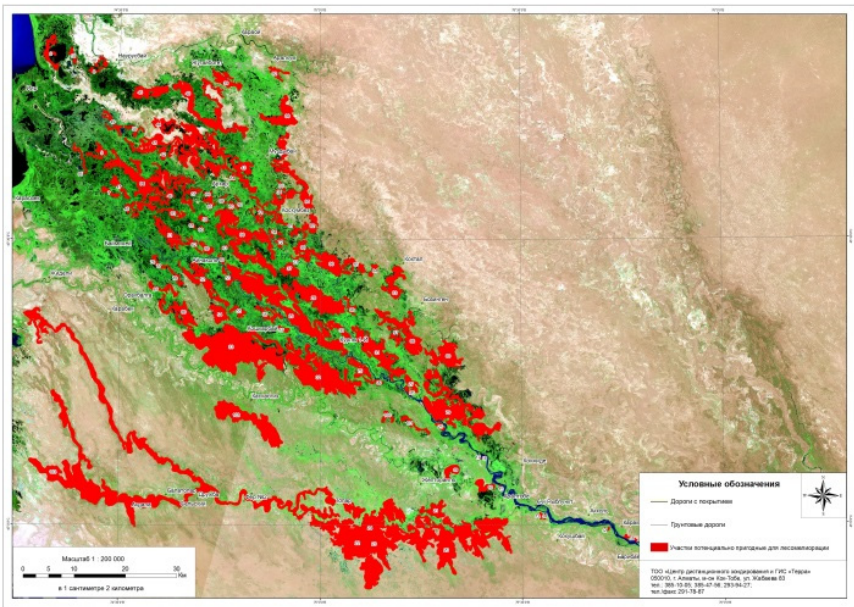

Рисунок 11. Пример расположения участков, пригодных для лесовосстановления (*по данным ЦДЗ и ГИС «Терра»*)

Более перспективным может оказаться применение клонирования. В частности, проведенные в дельте экспериментальные посадки на трех площадках с типичными условиями лесопригодности, показали, что из высаженных 500 однолетних саженцев туранги разнолистной клонального и семенного происхождения в соотношении 1:1 выживаемость клонированных саженцев после первой зимы составила не менее 70%, тогда как выращенные из семян саженцы погибли практически полностью. Для лучшей приживаемости предпочтительна высадка двух- или трехлетних саженцев, с обеспечением дополнительного полива в засушливый период.

Важный дополнительный эффект осуществления проекта по лесовосстановлению в дельте р. Или состоит в поглощении атмосферного углерода за счет роста массы деревьев в созданных посадках. Формирование стоков углерода традиционно относится к задачам смягчения (mitigation) изменения климата, что усиливает климатическую значимость проекта. Ранее нами был построен прогноз поглощения углерода фитомассой лесных насаждений, планируемых к созданию в дельте р. Или (Замолодчиков и др., 2019). Оригинальная система прогнозных расчетов включает сглаженные таблицы хода роста лесных культур, процедуры конверсии объемных запасов древесины в углерод фитомассы, вычисления с шагом в 1 год площадей и суммарных запасов углерода в лесных культурах разного возраста на основе сценария посадок. Этот сценарий базируются на следующих допущениях: 1) облесение проводится на площади 200 тыс. га; 2) на 30% площади осуществляются посадки туранги разнолистной, на 60% территории лоха восточного, и на 10% ивы джунгарской и ивы Вильгельмса; 3) общая продолжительность проекта равна

30 годам; 4) устройство лесных культур производится в течение первых 12 лет осуществления проекта на 8.3% от общей площади (16677 га) за год; 5) не рассматривается влияние ситуаций, которые могут привести к гибели посадок (потравы скотом, вспышки древесных вредителей и болезней, лесные пожары, засухи и так далее). Согласно полученному прогнозу, величина годичного поглощения углерода возрастает от 2 тыс. т С в первый год до максимальных 264 тыс. т С на 16-м году осуществления проекта, затем снижается до 101 тыс. т С к 30-му году. Суммарное накопление углерода в фитомассе за 30 лет составит 4.63 млн т С или 16.98 млн т CO_2. Найденные значения поглощения углерода достаточно высоки, чтобы служить дополнительным обоснованием экологических преимуществ проекта по восстановлению тугайных лесов в дельте р. Или.

Заключение

Изменения климата на территории Казахстана, в том числе в Алматинской области и дельте р. Или, наблюдаются достаточно отчетливо с 1975 г. Они указывают на усиление аридизации климата и будут усиливаться при любом сценарии выбросов парниковых газов (от RCP2.6 и RCP4.5 до RCP8.5). Из экстремальных погодных явлений за тот же период участились волны тепла, повысились максимальные температуры, возрос риск наводнений, связанный с интенсивным таянием ледников. В будущем ожидается усиление засух и пыльных бурь из-за повышения температуры и роста потребления воды, которые могут, в том числе, привести к обмелению оз. Балхаш.

Одновременно сельское хозяйство требует все большее количество воды для обеспечения продовольствием населения страны. Оценка возможных последствий изменений климата и развития социально-экономической деятельности в бассейне р. Или указывает на высокую вероятность повторения Аральского кризиса на оз. Балхаш. Для его предотвращения необходимо предпринять ряд мер по адаптации к изменениям климата.

Также вызывает опасение состояние ледников, т.к. они вносят значительный вклад в питание р. Или летом, когда значительно увеличивается водопотребление. Исследования подтвердили значительную деградацию ледников в верховьях р. Или и их вероятное дальнейшее сокращение (по прогнозам МГЭИК). Тем не менее запасов ледников может быть достаточно для обеспечения водой бассейна р. Или вплоть до ее нижнего течения на период до конца XXI века при условии внедрения адаптационных мер.

Адаптация должна быть комплексной и включать водосберегающие технологии в сельском хозяйстве с одной стороны, и меры по поддержанию гидрологического режима с применением экосистемных функций и оптимизации режима работы водохранилищ – с другой. Одной из основных адаптационных мер может являться восстановление водорегулирующей функции дельты р. Или. Проведенные исследования подтверждают эффективность и целесообразность мероприятия, если лесопокрытая площадь достигнет не менее 30% от площади дельты, т.е. лесовосстановление будет успешно осуществлено на

площади не менее 200 тыс. га. Поддержание оптимальной степени залесенности дельты позволит в будущем уменьшить дефицит воды в дельте р. Или в засушливый период, что, в свою очередь, снизит риск обмеления водотоков в устье реки и падения уровня оз. Балхаш.

Для этого была разработана методика выделения площадей на территории дельты, а также методика восстановления лесов, сочетающая подход адаптации на основе экосистем с экосистемным подходом при ликвидации накопленного антропогенного ущерба. В результате были начаты пилотные посадки деревьев с учетом ограничений деятельности на особо охраняемых природных территориях, чтобы водно-болотное угодье международного значения не утратило свой статус.

Лесовосстановление в дельте р. Или также будет иметь значимый для Казахстана эффект поглощения углекислого газа: 16.98 млн т CO_2 за 30 лет. Теоретически можно было бы добиться и больших значений, но тогда бы снизился либо адаптационный эффект из-за слишком высоких расходов воды на транспирацию, либо природоохранный, т.к. пришлось бы использовать инвазивные виды.

Результаты исследований и разработанные методики получили одобрение и согласование со стороны Казгидромета, Комитета лесного хозяйства и животного мира, а также Министерства энергетики Казахстана как Национального уполномоченного органа для Зеленого климатического фонда.

Описанная многокомпонентная методика научного обоснования проектов по адаптации на основе экосистем может быть широко применена для лесных климатических проектов.

Прямая репликация подходов возможна на реках с большими дельтами, впадающих в замкнутые озера, таких как Амударья и Сырдарья в Центральной Азии, а также в ряде стран Африки.

Работы выполнены при поддержке WWF России, темы госзадания № АААА–А18–118052400130–7 Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, а также программ и проектов Росгидромета (тема 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций»).

Список литературы

Абдрахимов Р.Г., Амиргалиева А.С. 2018. Оценка характеристик годового стока рек Иле-Балкашского водохозяйственного бассейна. – Гидрометеорология и экология, № 1, с. 41-51.

Атлас мирового водного баланса. 1974. – М.-Л., Гидрометеоиздат, 65 л.

Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. 1989. Природа Мира. Ледники. – М., Мысль, 447 с.

Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Липка О.Н. 2019. Прогнозная оценка пог-

лощения углерода при восстановлении тугайных лесов – Теоретическая и прикладная экология, № 4, с. 95-101.

Казгидромет 2018. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2017 год. – Астана, 60 с.

Казгидромет, официальный сайт. – Электронный ресурс. URL: https://www.kazhydromet.kz/ (дата обращения 03 мая 2020).

КБР 2003. Экосистемный подход: дальнейшее уточнение, руководящие принципы применения и взаимоотношение с устойчивым лесопользованием. Девятое совещание по научным, техническим и технологическим консультациям. Монреаль, 10-14 ноября 2003 г. Пункт 5.1 предварительной повестки дня. – Электронный ресурс. URL: https://www.cbd.int/doc/meetings/sbstta/sbstta-09/official/sbstta-09-08-ru.pdf (дата обращения 27 августа 2020).

КБР 2018. Рекомендация, принятая вспомогательным органом по научным, техническим и технологическим консультациям. П. 22/7. Биоразнообразие и изменение климата: подходы с позиций экосистем к адаптации к изменению климата и уменьшению опасности стихийных бедствий. Двадцать второе совещание Монреаль, Канада, 2-7 июля 2018 года. Пункт. 9 повестки дня. – Электронный ресурс. URL: https://www.cbd.int/doc/recommendations/sbstta-22/sbstta-22-rec-07-ru.pdf (дата обращения 27 августа 2020).

Михайлов В.Н. 1997. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. – М., ГЕОС, 413 с.

Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. 2005. Гидрология. – М., «Высшая школа», 463 с.

Попова В.П., Шиварева С.П., Домран А.О. 2010. Водный баланс озера Балхаш за период с 2000 по 2009 годы. – Гидрометеорология и экология, № 4, с. 92-100.

ПРООН 2016. Атлас функционального зонирования Балхашского района Алматинской области. – Астана, 64 с.

Сводное ежегодное сообщение о состоянии и изменении климата на территориях государств-участников СНГ за 2019 год. 2020. – Москва, 65 с.

Седьмое национальное Сообщение и третий двухгодичный Доклад Республики Казахстан Рамочной конвенции ООН об изменении климата. 2017. – Астана, 304 с. – Электронный ресурс. URL: http://sustainable.eep.kz/upload/RUS_Saulet_Report_12-2017_RUS.pdf (дата обращения 03 мая 2020).

Семенов С.М., Анисимов О.А., Борщ С.В., Георгиевский В.Ю., Инсаров Г.Э., Кобышева Н.В., Костяной А.Г., Кренке А.Н., Сиротенко О.Д., Фролов И.Е., Хлебникова Е.И., Шерстюков Б.Г., Ананичева М.Д., Анохин Ю.А., Асарин А.Е., Асмус В.В., Болгов М.В., Борисова О.К., Величко А.А., Григорьев А.В., Гудкович З.М., Демченко П.Ф., Карклин В.П., Кислов А.В., Клячкин С.В., Корзухин М.Д., Кровотынцев В.А., Крупчатников В.Н., Кудеяров В.Н., Лавров С.А., Лебедев С.А., Малкова Г.В., Минин А.А., Мяч Л.Т., Никонова Р.Е.,

Носенко Г.А., Ольчев А.В., Павлов А.В., Павлова В.Н., Павлова Т.В., Полунин А.Я., Попова В.В., Попова Е.Н., Поповнин В.В., Романовский В.А., Сирин А.А., Смоляницкий В.М., Сперанская Н.А., Стрелецкий Д.А., Терзиев Ф.С., Филиппов Ю.Г., Фролов С.В., Харук В.И., Холодов А.Л., Хромова Т.Е., Шалыгин А.Л., Шикломанов Н.И., Шмакин А.Б. 2012. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М., Росгидромет, 551 с.

Снытко В.А. (отв. ред.). 1989. Гидрологическая роль лесных геосистем. – Новосибирск, «Наука», Сибирское отделение, 166 с.

Стародубцев В.М., Трускавецкий С.Р. 2011. Процессы опустынивания в дельте р. Или под воздействием антропогенной нагрузки. – Водные ресурсы, т. 38, № 2, с. 248-251.

Школьник И.М., Пигольцина Г.Б., Ефимов С.В. 2018. Воздействия глобального потепления на сельское хозяйство аридных зон Средней Азии в середине XXI века по оценкам ансамбля региональной климатической модели. – В кн.: Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А. И. Воейкова. Выпуск 589. /Под редакцией д-ра физ.-мат. наук В.М. Катцова, д-ра физ.-мат. наук В.П. Мелешко. – Санкт-Петербург, с. 5-49.

FAO, UNECE 2018. Forests and Water Valuation and payments for forest ecosystem services. – Geneva, 108 p.

Guo L., Xia Z. 2014. Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin. – Theor. Appl. Climatol., vol. 115, pp. 219-229. – Available at: https://doi.org/10.1007/s00704-013-0883-3 (Accessed 3 May 2020).

Ili River Delta and South Lake Balkhash. 2012. – Ramsar Sites Information Service. –Available at: https://rsis.ramsar.org/ris/2020 (Accessed 3 May 2020).

Information Sheet on Ramsar Wetlands (RIS) – 2009-2012 version. 2011. Ili River Delta and South Lake Balkhash. – Available at: https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/KZ2020RIS.pdf (Accessed 3 May 2020).

IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. –Available at: https://www.ipcc–nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_languages.html (Accessed 3 May 2020).

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley eds. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p. – Available at: https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324 (Accessed 3 May 2020).

IPCC 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Field C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee,

K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p.

IPCC 2019a. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems /P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.).

IPCC 2019b. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.).

Isupova M.V. 2019. The Effects of the Ili River Runoff and Water Regulation Function of the Delta on the Changing Water Level of Balkhash Lake Depending on the Delta Forest Coverage. – Water Resources, vol. 46, Suppl. 1, pp. S29-S42 ISSN 0097-8078.

Rubel F., Kottek M. 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. – Meteorol. Z., vol. 19, pp. 135-141. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430.

UNEP 1992. World atlas of desertification (United nations environment programme) /edited by N. Middleton and D.S.G. Thomas. – Edward Arnold, London, ix + 69 p.

Статья поступила в редакцию: 8 июня 2020 г. *После переработки: 12 октября 2020 г.*

APPROACHES TO A LARGE-SCALE ECOSYSTEM-BASED ADAPTATION PROJECT DEVELOPMENT IN THE ILI RIVER DELTA (KAZAKHSTAN)

*O.N. Lipka[1)] *, G.M. Mazmaniants[2)], M.V. Isupova[3)], A.A. Aleynikov[4)], D.G. Zamolodchikov[5)], V.V. Kaganov[5)]*

[1)]Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation;
* corresponding author: *olipka@mail.ru*

[2)] WWF Central Asia,
248Б, of. 210, Dostyk Avenue, 050051, Almaty, Kazakhstan

[3)] Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences,
3, Lubkin str., 119333, Moscow, Russian Federation

[4)] SKANEKS GROUPS,
22nd km. Kiev Highway, Home Ownership 4, Corps A, of. 819A, 108811, Moscow, Russian Federation

[5)] Center for Ecology and Forest Productivity of the Russian Academy of Sciences,
84/32, p. 14, 117997, Moscow, Trade Union Str., Russian Federation

Abstract. The scientific justification for ecosystem-based adaptation projects, especially large-scale projects, is complex, requiring correspondence to following conditions: the place has to be adversely impacted by climate change or will be affected in the foreseeable future; the planned activities would have the necessary adaptation effect; the results will be long term sustainable under any climate change scenario; for forest's ecosystem services – adaptation activities will have a significant mitigation result. The article describes the methods for studying each of the components (climate change, hydrological regime change, state of glacial resources to provide runoff, hydrological efficiency of the delta as a natural counter-regulator, conditions for reforestation, sufficient adaptation and mitigation results) for the case study of tugai forests restoration in the Ili River Delta (Kazakhstan). The investigations have confirmed effectiveness and viability of the planning adaptation activities and methods.

Keywords. Climate change, ecosystem-based adaptation, Ili River, Lake Balkhash, delta, reforestation.

References

Abdrakhimov R.G., Amirgalieva A.S. 2018. Otsenka kharakteristik godovogo stoka rek Ile-Balkashskogo vodokhozyaystvennogo basseyna [The characteristics of the annual river flow of the Ile-Balkhash water basin assessment]. *Gidrometeorologiya i ekologiya – Hydrometeorology and ecology*, no. 1, pp. 41-51.

Atlas mirovogo vodnogo balansa [Atlas of the World Water Balance]. 1974. Moscow-Leningrad, Gidrometeoizdat, 65 p.

Dolgushin L.D., Osipova G.B. 1989. *Priroda Mira. Ledniki* [The nature of the world. Glaciers]. Moscow, 447 p.

Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Lipka O.N. 2019. Prognoznaya otsenka pogloshcheniya ugleroda pri vosstanovlenii tugaynykh lesov [Predictive estimates of carbon sequestration under tugai forest restoration]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya – Theoretical and Applied Ecology*, no. 4, pp. 95-101.

Kazhydromet 2018. *Yezhegodnyy byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana: 2017 god* [Kazakhstan Annual Climate Monitoring and Climate Change Bulletin: 2017]. Astana, 60 p.

Kazhydromet, official web-site. Available at: https://www.kazhydromet.kz/ (accessed 3 May 2020).

CBD 2003. Ecosystem approach: further refinement, application guidelines and relationship with sustainable forest management. Ninth Meeting on Scientific, Technical and Technological Advice. Montreal, November 10-14, 2003 Item 5.1 of the provisional agenda. Available at: https://www.cbd.int/doc/meetings/sbstta/sbstta-09/official/sbstta-09-08-ru.pdf (assessed 27 August 2020).

CBD 2018. Recommendation adopted by the subsidiary body for scientific, technical and technological advice. P. 22/7. Biodiversity and climate change: ecosystem-based adaptation approaches to climate change and disaster risk reduction. Twenty-second meeting. Montreal, Canada, 2-7 July 2018. Agenda item 9. Available at: https ://www.cbd.int/doc/recommendations/sbstta-22/sbstta-22-rec-07-ru.pdf (assessed 27 August 2020).

Mikhailov V.N. 1997. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloye, nastoyashcheye i budushcheye* [River mouths of Russia and neighboring countries: past, present and future]. Moscow, GEOS, 413 p.

Mikhailov V.N., Dobrovolsky A.D., Dobrolyubov S.A. 2005. *Gidrologia* [Hydrology]. Moscow, 463 p.

Popova V.P., Shivareva S.P., Domran A.O. 2010. Vodnyy balans ozera Balkhash za period s 2000 po 2009 gody [The Lake Balkhash water balance from 2000 to 2009]. *Gidrometeorologiya i ekologiya – Hydrometeorology and ecology*, no. 4, pp. 92-100.

UNDP 2016. *Atlas funktsional'nogo zonirovaniya Balkhashskogo rayona Almatinskoy oblasti* [Atlas of functional zoning of the Balkhash district of Almaty region]. Astana, 64 p.

Svodnoye yezhegodnoye soobshcheniye o sostoyanii i izmenenii klimata na territoriyakh gosudarstv-uchastnikov SNG za 2019 god [Consolidated annual report on the state and climate change in the territories of the CIS member states for 2019]. 2020. Moscow, 65 p.

Sed'moye natsional'noye Soobshcheniye i tretiy dvukhgodichnyy Doklad Respubliki Kazakhstan Ramochnoy konventsii OON ob izmenenii klimata [Seventh National Communication and Third Biennial Report of the Republic of Kazakhstan to the UN Framework Convention on Climate Change]. 2017. Astana, 304 p. Available at: http://sustainable.eep.kz/upload/RUS_Saulet_Report_12-2017_RUS.pdf (Accessed 3 May 2020).

Semenov S.M., Anisimov O.A., Borshch S.V., Georgiyevskiy V.YU., Insarov G.E., Kobysheva N.V., Kostyanoy A.G., Krenke A.N., Sirotenko O.D., Frolov I.Ye., Khlebnikova Ye.I., Sherstyukov B.G., Ananicheva M.D., Anokhin YU.A., Asarin A.Ye., Asmus V.V., Bolgov M.V., Borisova O.K., Velichko A.A., Grigor'yev A.V., Gudkovich Z.M., Demchenko P.F., Karklin V.P., Kislov A.V., Klyachkin S.V., Korzukhin M.D., Krovotyntsev V.A., Krupchatnikov V.N., Kudeyarov V.N., Lavrov S.A., Lebedev S.A., Malkova G.V., Minin A.A., Myach L.T., Nikonova R.Ye., Nosenko G.A., Ol'chev A.V., Pavlov A.V., Pavlova V.N., Pavlova T.V., Polunin A.YA., Popova V.V., Popova Ye.N., Popovnin V.V., Romanovskiy V.A., Sirin A.A., Smolyanitskiy V.M., Speranskaya N.A., Streletskiy D.A., Terziyev F.S., Filippov YU.G., Frolov S.V., Kharuk V.I., Kholodov A.L., Khromova T.Ye., Shalygin A.L., Shiklomanov N.I., Shmakin A.B. 2012. *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Climate change impact assessment methods for physical and biological systems]. Moscow, Roshydromet, 551 p.

Snytko V.A. (ed.). 1989. *Gidrologicheskaya rol' lesnykh geosistem* [The hydrological role of forest geosystems]. Novosibirsk, “Science”, Siberian Branch, 166 p.

Starodubtsev V.M., Truskavetsky S.R. 2011. Protsessy opustynivaniya v del'te r. Ili pod vozdeystviyem antropogennoy nagruzki [Desertification processes in the Ili River Delta under anthropogenic press]. *Vodnyye resursy – Water resources*, vol. 38, no. 2, pp. 248-251.

Shkolnik I.M., Pigoltsina G.B., Efimov S.V. 2018. Vozdeystviya global'nogo potepleniya na sel'skoye khozyaystvo aridnykh zon Sredney Azii v seredine XXI veka po otsenkam ansamblya regional'noy klimaticheskoy modeli [The effects of global warming on agriculture in the arid zones of Central Asia in the middle of the XXI century according to estimates of the ensemble of the regional climate model]. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii im. A. I. Voyeykova – Proceedings of A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory*, Issue 589. St. Petersburg, pp. 5-49.

FAO, UNECE 2018. Forests and Water Valuation and payments for forest ecosystem services. – Geneva, 108 p.

Guo L., Xia Z. 2014. Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin. – Theor. Appl. Climatol., vol. 115, pp. 219-229. – Available at: https://doi.org/10.1007/s00704-013-0883-3 (Accessed 3 May 2020).

Ili River Delta and South Lake Balkhash. 2012. – Ramsar Sites Information Service. –Available at: https://rsis.ramsar.org/ris/2020 (Accessed 3 May 2020).

Information Sheet on Ramsar Wetlands (RIS) – 2009-2012 version. 2011. Ili River Delta and South Lake Balkhash. – Available at: https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/KZ2020RIS.pdf (Accessed 3 May 2020).

IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. –Available at: https://www.ipcc–nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_languages.html (Accessed 3 May 2020).

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley eds. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p. – Available at: https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324 (Accessed 3 May 2020).

IPCC 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Field C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p.

IPCC 2019a. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems /P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.).

IPCC 2019b. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.).

Isupova M.V. 2019. The Effects of the Ili River Runoff and Water Regulation Function of the Delta on the Changing Water Level of Balkhash Lake Depending on the Delta Forest Coverage. – Water Resources, vol. 46, Suppl. 1, pp. S29-S42 ISSN 0097-8078.

Rubel F., Kottek M. 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. – Meteorol. Z., vol. 19, pp. 135-141. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430.

UNEP 1992. World atlas of desertification (United nations environment programme) /edited by N. Middleton and D.S.G. Thomas. – Edward Arnold, London, ix + 69 p.