

УДК 551.582+631.92

## КЛИМАТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ В ДЕЛЬТЕ р. ИЛИ

© 2021 г. О. Н. Липка<sup>а</sup>, \*, Д. Г. Замолотчиков<sup>б</sup>, В. В. Каганов<sup>б</sup>, Г. А. Мазманяц<sup>с</sup>,  
М. В. Исупова<sup>д</sup>, А. А. Алейников<sup>е</sup>

<sup>а</sup>Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

<sup>б</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

<sup>с</sup>WWF России – Центрально-азиатская программа, Алматы, Казахстан

<sup>д</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>е</sup>ГК «СКАНЭКС», Москва, Россия

\*e-mail: [olipka@mail.ru](mailto:olipka@mail.ru)

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.

После доработки 24.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Климатический эффект восстановления лесов имеет комплексный характер: как средство адаптации к изменению климата и как средство по поглощению и долгосрочному хранению углерода (митигационный эффект). В статье рассматривается совокупность мер по лесовосстановлению, направленных на сохранение экосистем оз. Балхаш и низовьев р. Или, которые позволят снизить их уязвимость к изменениям климата и антропогенным факторам. Как деятельность по адаптации к изменению климата восстановление тугайных лесов призвано повысить водорегулирующую и средообразующую функции дельты р. Или, что позволит стабилизировать водный режим оз. Балхаш и увеличить устойчивость его экосистем к изменениям климата. Создаваемые лесные насаждения будут накапливать углерод в пулах фитомассы, мертвой древесины, подстилки и почвы. Охарактеризована расчетная методика, позволяющая осуществлять прогноз поглощения углерода пулом фитомассы создаваемых лесных культур при наличии отрывочных данных по динамике таксационных показателей. Найденные величины поглощения углерода применены к сценариям лесовосстановления по отдельным лесообразующим породам. Согласно полученным прогнозам, лесовосстановление в дельте р. Или на площади 200 тыс. га в течение 30 лет приведет к накоплению древесным 7 Мт С, что соответствует поглощению 1.15 т С/га/год.

*Ключевые слова:* изменение климата, адаптация к изменениям климата, оз. Балхаш, р. Или, дельта, лесовосстановление, фитомасса древостоев, поглощение углерода, прогнозные расчеты, климатические проекты

DOI: 10.31857/S2587556621040051

### ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата ведут к негативным последствиям в ряде регионов, в том числе и в Казахстане. В условиях современного и прогнозируемого роста температуры воздуха во все сезоны (Седьмое..., 2017), ведущего к росту эвапотранспирации, и изменений увлажненности водосбора, связанных с существенной антропогенной нагрузкой (зарегулирование стока р. Или, изъятие вод на орошение и т.д.), возрастает риск повторения на оз. Балхаш сценария Аральского моря (Байкенова, Вьюхина, 2018). Усиление водорегулирующей функции дельты р. Или позволит предотвратить пересыхание оз. Балхаш и таким образом способствовать адаптации к изменениям

климата казахстанской части Или-Балхашского бассейна.

Сток р. Или составляет 70% от общего поступления воды в оз. Балхаш (Isupova, 2019). Ранее значительную роль в регулировании гидрологического режима р. Или и оз. Балхаш играли пойменные и дельтовые тугайные леса, которые сглаживали резкие колебания уровня воды, способствуя ее накоплению во влажный период с постепенным поступлением в озеро в сухой сезон. Сомкнутый древесный полог в тугайных лесах замедлял снеготаяние и предохранял почву от пересыхания летом. В результате хозяйственной деятельности, а также сопряженных с ней пожаров большая часть территории дельты была преобразована в травяные пастбища и малолесные земли. В современных условиях покрытие лесом составляет лишь

5% от площади дельты, что не позволяет ей выполнять водорегулирующие функции. Строительство Капчагайской ГЭС не только изменило естественный ход стока, но также привело к падению уровня оз. Балхаш на 1.0–1.5 м, сокращению поступления наносов и невозможности привноса семян в дельту из верхней части бассейна во время паводков.

Цель настоящей статьи – анализ потенциального климатического эффекта от восстановления тугайных лесов в дельте р. Или с точки зрения адаптации региона к изменению климата с элементами митигации. При этом решаются следующие задачи: 1) анализ методов лесовосстановления и расчет минимально необходимых площадей лесопосадок для того, чтобы адаптационный эффект оказался значимым с учетом изменений климата и растущего водопотребления; 2) оценка масштабов депонирования углерода создаваемыми лесными культурами в ближайшие 30 лет при различных сценариях посадок.

В случае подтверждения достаточной адаптационной и митигационной эффективности методов результаты исследования могут послужить обоснованием крупномасштабного проекта, направленного на усиление водорегулирующей и средообразующей функции дельты, создание на территории благоприятного микроклимата, стабилизацию водного режима оз. Балхаш, а также повышение устойчивости экосистем к прогнозируемым изменениям климата до конца XXI в. в соответствии с “жестким” сценарием Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

**Климат и его прогнозируемые изменения.** Казахстан расположен в центре Евразии в жарком и засушливом климате. Средняя годовая температура в дельте р. Или составляет 8°C. Континентальность выражается в значительной суточной амплитуде температур: 17°C летом и 11°C зимой. Абсолютная максимальная температура превышает 45°C, а минимальная может опускаться до –45°C (ПРООН..., 2016).

Среднее годовое количество осадков увеличивается с севера на юг с 150 до 190 мм (ПРООН..., 2016). Величина испарения значительно варьируется: от 500 мм с поверхности почвы до 1080 мм – с водоемов и 1550 мм – с полупогруженных тростниковых зарослей. Индекс сухости Будыко составляет 7.33 и соответствует значениям для пустыни (Атлас..., 1974; Михайлов, 1997); по значениям индекса аридности территория относится к аридной (0.05–0.2) области (IPCC, 2019). Водно-болотные

экосистемы дельты р. Или являются интразональными экосистемами.

Повышение среднегодовой температуры зафиксировано на всей территории Казахстана. Изменение аномалий за период 1941–2015 гг. достигает 2°C (Седьмое..., 2017), а с 1976 по 2017 г. шло со скоростью 0.34°C/10 лет (Казгидромет..., 2018). С 1971 по 2014 г. среднегодовая температура повысилась на 1.2–1.3°C (ПРООН..., 2016). Географическое распределение динамики осадков неоднородно, в Алматинской области отмечается слабый рост (Казгидромет..., 2018). Тенденция одновременного увеличения количества осадков и роста температуры характерна и для китайской части Или-Балхашского бассейна с 1940 г. (Guo, Xia, 2014).

При любых сценариях изменений климата МГЭИК (от RCP2.6 до RCP8.5) повышение температуры в Центральной Азии будет продолжаться, но с разной скоростью. Для сценария RCP4.5 прогнозируемое изменение среднегодовой температуры воздуха к 2030 г. составит 1.5–1.7°C, а к концу XXI в. – более чем 3°C. При сценарии RCP8.5 к концу века повышение температуры может достигнуть 6.0°C (6.1°C летом) (Седьмое..., 2017).

Изменение осадков различается в зависимости от сценариев. При сценарии RCP4.5 ожидается рост количества осадков во все сезоны до 13.21 мм в год (7.99 мм летом). При RCP8.5 на фоне общего среднегодового роста (11.77 мм) количество осадков летом с середины века начинает сокращаться: от –0.43 до –2.07 мм в конце века (Седьмое..., 2017). В любом случае рост летних осадков не способен компенсировать нарастающую засушливость из-за повышения температуры. При реализации сценария RCP8.5 ситуация становится тяжелой: усиление и распространение процессов опустынивания, необратимая деградация оз. Балхаш по Аральскому сценарию.

Изменение климата меняет характер функционирования экосистем и их способность оказывать те услуги, от которых зависит жизнь и здоровье населения. Дельта р. Или вместе с оз. Балхаш выделена Казгидрометом<sup>1</sup> как одна из крупнейших природных экологических систем на территории Казахстана, где необходимо срочно применять адаптационные программы в водном и экосистемном секторах (ПРООН..., 2016) для предотвращения крупной экологической катастрофы в регионе.

**Рельеф и ледники.** Рельеф бассейна р. Или неоднородный. Дельта р. Или располагается на низкой равнине с незначительным уклоном к

<sup>1</sup> Национальная гидрометеорологическая служба Республики Казахстан. <https://www.kazhydromet.kz/ru/about/o-nationalnoy-gidrometeorologicheskoy-sluzhbe-kazahstana>



Рис. 1. Физико-географическая карта дельты р. Или. Источник: (ПРООН..., 2016).

оз. Балхаш. Абсолютные отметки колеблются в интервале 300–400 м над ур. м. (рис. 1). Рельеф осложняется множеством протоков и сухих русел, глубиной 0.5–5 м, а также невысокими песчаными буграми высотой 2–6 м (ПРООН..., 2016).

В бассейне р. Или находятся четыре крупных очага оледенения, вносящих значительный вклад в питание реки. Ледники Джунгарского Алатау, Восточного Тянь-Шаня в границах бассейна имеют преимущественно южную экспозицию, тогда как ледники Большого Тянь-Шаня и Заилийского Алатау – северную, что влияет на изначаль-

ные площади оледенения и интенсивность таяния за рассматриваемый период.

Согласно имеющимся данным (Долгушин, Осипова, 1989), в бассейне р. Или в середине 1980-х годов насчитывалось 2373 ледника общей площадью 2022.7 км<sup>2</sup>. Согласно дешифрированию космических снимков Sentinel-2 2018 г., количество ледников увеличилось до 2648, но при этом общая площадь сократилась на 10.02% по сравнению с 1980-ми годами.

**Гидрология.** Устьевая область р. Или включает обширную дельту площадью более 8200 (до 9750) км<sup>2</sup>

(Михайлов, 1997; Стародубцев, Трускавецкий, 2011) и устьевое взморье. Современная дельта р. Или имеет форму треугольника с вершиной, расположенной в 120 км от оз. Балхаш, и основанием вдоль берега озера. Дельта р. Или имеет несколько постоянных рукавов — Или (Иле), Топар, Жидели, Иир, Нарын. Севернее находится территория древней “сухой” дельты р. Или (~10 тыс. км<sup>2</sup>) (Михайлов, 1997).

По данным (Михайлов, 1997), в 1960-х годах в дельте насчитывалось 9513 озер общей площадью 679 км<sup>2</sup> при площади дельты 20 тыс. км<sup>2</sup> до наполнения Капчагайского водохранилища. В других работах (Стародубцев, Трускавецкий, 2011) отмечено, что с середины 1980-х годов по настоящее время площадь озер уменьшилась с 1200 до 200 км<sup>2</sup>.

Питание реки осуществляется за счет сезонных снегозапасов и ледников (в сумме ~60%), грунтовых (~30%) и дождевых (10%) вод. Для ее водного режима характерно наличие весенне-летнего половодья, начинающегося в естественных условиях в апреле—мае и продолжающегося до середины июня. Волна ледникового паводка наблюдается в июле—августе и превышает первый пик расходов воды. С сентября по март река маловодна.

Среднегодовое стока воды р. Или в вершине дельты за 1975–2015 гг. составляет 14.0 км<sup>3</sup>/год (Isupova, 2019). В результате зарегулирования стока в вершине дельты, начиная с 1980 г., сократился в среднем на 2–3% ежемесячно (октябрь—май), за июль — с 16.4 до 10.0%, а за август — с 15.9 до 9.6% годового стока. Среднемесячный расход воды в летние месяцы уменьшился с 1000 до 400–500 м<sup>3</sup>/с, а уровни воды на пике паводка снизились на 1.0–1.5 м. (Isupova, 2019). Средние минимальные расходы воды, напротив, возросли с 133–148 до 250–280 м<sup>3</sup>/с. Начиная с 1987 г., отмечается наличие тренда в увеличении стока р. Или (Галаева, 2014; Стародубцев, Трускавецкий, 2011; Шиварева, Галаева, 2014). Сток в нижнем бьефе Капчагайской ГЭС увеличился с 11.6 км<sup>3</sup>/год в 1970–1986 гг. до 15.4 км<sup>3</sup>/год в 1987–2011 гг. (среднегодовое значение за 1970–2011 гг. — 13.8 км<sup>3</sup>/год) (Галаева, 2014). Однако в последние годы казахстанские исследователи отмечают, что, несмотря на климатически обусловленное увеличение естественного стока воды р. Или (рост температуры воздуха и увлажненности в горных частях водосбора реки, таяние ледников), фактический сток воды на 50–139 м<sup>3</sup>/с ниже, что способствует уменьшению обводнения дельты. Такое снижение стока связывают с интенсивным изъятием вод реки в Китае: за 1970–2004 гг. суммарное сокращение стока воды р. Или, поступающего из Китая, составило ~80 км<sup>3</sup> (Стародубцев, Трускавецкий, 2011). Также снизились уровни

грунтовых вод — на 3.0–3.5 м в верхней части дельты и 1.0 м в средней.

Таким образом, несмотря на то, что непосредственное регулирование уровня оз. Балхаш осуществляется попусками Капчагайской ГЭС, на него оказывает существенное воздействие погодно-климатические факторы: количество и режим выпадения осадков на территории бассейна, активизация таяния ледников в последние десятилетия, усиление испарения с поверхности водохранилища и озера. Кроме того, важную роль играет увеличение водопотребления в обеих странах. Значительная часть стока теряется на инфильтрацию, испарение и транспирацию в дельте, расположенной в зоне недостаточного увлажнения. За 2000–2009 гг., по имеющимся данным (Попова и др., 2010), потери стока оцениваются в среднем в 4.54 км<sup>3</sup>/год при величине стока р. Или в этот период 16.3 км<sup>3</sup>/год.

В период половодья происходит заливание дельты р. Или, которое способствует увлажнению почвы, развитию растительности, обводнению нерестилищ, увеличению запасов грунтовых вод. Площадь водной поверхности в дельте р. Или и озерах составляет в межень 219 + 200 = 419 км<sup>2</sup> (5.1% дельты, принятой 8200 км<sup>2</sup>). При этом в весеннюю часть половодья под водой оказываются от 1146 до 1519 км<sup>2</sup> территории дельты (14–18.5% ее площади), а во вторую волну в августе — до 1161 км<sup>2</sup> (14.2%).

Свойства дельты реки накапливать воду подобно губке во время паводков в многоводные годы и постепенно отдавать в более засушливые периоды позволяют рассматривать дельту р. Или в качестве естественного контррегулятора уровня оз. Балхаш. Если площадь дельты для этого является достаточной, то регулирующая функция может быть усилена за счет повышения эффективности. Лес способствует преобразованию поверхностного стока в подземный, т.е. большему запасанию воды в дельте. Кроме того, под пологом леса, в тени, сохраняется больше почвенной влаги. Залесенная в достаточной степени дельта может служить способом адаптации к изменениям климата для региона и не допустить снижения уровня оз. Балхаш.

## МЕТОДЫ

**Выбор территорий для лесовосстановления.** При выборе на территории дельты р. Или площадей для лесовосстановления проводились следующие операции: 1) по данным дистанционного зондирования определялись участки, непригодные для посадок деревьев: водные объекты, переувлажненные или засоленные; 2) выбирались участки, занимающие нижнее и среднее положение в катенах, выположенные, с относительно сомкнутым

травянистым покровом или сохранившимися фрагментами древесно-кустарниковой растительности; 3) оценивались доступность территории (удаленность от дорог, наличие ручьев, озер, проток, затрудняющих доступ) и наличие водоемов для полива.

Всю территорию дельты занимает водно-болотное угодье международного значения “Дельта р. Или и южная часть оз. Балхаш” (Ши..., 2012; Information..., 2011). В дельте были организованы два заказника и природный резерват “Иле-Балхаш”, которые охватывают большую часть ее территории, поэтому посадки лесных культур здесь следует вести с соблюдением ряда условий: 1) запрет на использование видов-интродуцентов; 2) минимизация механической обработки почвы при создании лесных культур; 3) минимизация фактора беспокойства для млекопитающих и птиц; 4) нежелательность изменения гидрологического режима на территории водно-болотного угодья международного значения и запрет на его изменение на территории резервата “Иле-Балхаш”; 5) запрещено прокладывать новые каналы для орошения, дренировать участки дельты, строить дамбы или мосты.

При установлении видов древесных растений, используемых при лесовосстановлении, учитывали следующие критерии: 1) встречаемость в аналогичных ненарушенных дельтовых сообществах; 2) эффективность для адаптационного проекта (скорость роста, формирования крон и создания теневого полога); 3) расположение на разных уровнях в фитокаменах; 4) высокая приживаемость саженцев и семян; 5) минимальные сроки ухода и дополнительного полива после посадки; 6) возможность получения достаточного количества посадочного материала.

На выбранных участках определялась степень пригодности лесорастительных условий для каждой из выбранных древесных пород. Ожидается, что в перспективе распределенные по территории дельты небольшие участки восстановленных лесов смогут стать ядрами естественного восстановления лесов на значительных территориях.

Лесовосстановление может проводиться на территориях государственного природного резервата “Иле-Балхаш”, гослесфонда, а также на арендованных участках сельскохозяйственных земель, что подразумевает привлечение местных жителей в качестве рабочих для посадок и будет способствовать созданию более 500 рабочих мест. Такой подход получил одобрение акимата Балхашского района и представителей Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан. С точки зрения заинтересованности крестьянских хозяйств речь идет о прямых финансовых выплатах за посадки и уход и о

привлекательности участков земли для содержания крупного рогатого скота.

**Поглощение углерода фитомассой лесных культур.** Нами ранее была предложена система аппроксимации хода роста (САХР), которая позволяет с достаточной точностью описывать рост лесных культур при наличии лишь отрывочных данных по густоте, средней высоте и среднему диаметру (Замолодчиков, 2009). Такое свойство САХР определяется выбором в качестве базовых набора асимптотических уравнений, математическая форма которых препятствует возникновению многократных отклонений прогноза от реальных значений. В краткой форме изложим базовые уравнения и полученные на их основе оценки накопления углерода.

Для описания изменения густоты посадок используется выражение (1), которое относится к уравнениям модифицированной экспоненты:

$$N(a) = NE + (N0 - NE)e^{Ka}, \quad (1)$$

где  $N(a)$  – густота к возрасту  $a$ ;  $NE$ ,  $N0$  и  $K$  – параметры. Уравнение (1) при отрицательном  $K$  задает экспоненциальное убывание густоты насаждения в приближении к асимптотическому значению  $NE$ , которое можно рассматривать как численность наиболее успешных во внутривидовой конкуренции особей.  $N0$  представляет собой начальную густоту насаждения. Параметр  $K$  характеризует темп изреживания: чем он выше, тем быстрее насаждение приближается к густоте  $NE$ .

Уравнение (2), характеризующее рост деревьев в высоту, – классическое логистическое уравнение, предложенное математиком П.Ф. Ферхюльстом:

$$H(a) = \frac{HEH0e^{Ka}}{HE - H0 + H0e^{Ka}}, \quad (2)$$

где  $H(a)$  – средняя высота насаждения к возрасту  $a$ ;  $HE$ ,  $H0$  и  $K$  – параметры.  $HE$  соответствует максимальной средней высоте, к которой асимптотически приближается фактическая средняя высота по мере роста лесного насаждения.  $H0$  это средняя высота в начальный момент времени, причем она не может равняться нулю. Уравнение (2) в наибольшей степени соответствует ситуации, когда лесовосстановление проводится с использованием саженцев, в момент посадки имеющих ненулевую высоту. Параметр  $K$  характеризует скорость приближения высоты насаждения к максимальной.

Соотношение между средней высотой и средним диаметром предлагается характеризовать степенным уравнением (3):

$$D = AH^B, \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр,  $H$  – высота,  $A$  и  $B$  – параметры. Значение параметра  $B$ , близкое к 1, означает, что

**Таблица 1.** Параметры уравнений для расчета избранных таксационных характеристик в насаждениях туранги, лоха и ивы

Порода	Параметры уравнений САХР							
	уравнение (1) густоты от возраста			уравнение (2) высоты от возраста			уравнение (3) диаметра от высоты	
	<i>NO</i>	<i>NE</i>	<i>K</i>	<i>HO</i>	<i>HE</i>	<i>K</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
Туранга разнолистная, хорошие условия	2500	806	-0.0862	0.995	15.98	0.271	1.132	1.070
Туранга разнолистная, обычные условия	2500	1157	-0.0960	0.746	13.60	0.234	1.594	0.934
Лох остроплодный	2500	1500	-0.0952	1.024	5.58	0.359	0.022	3.498
Ива белая	3409	45	-0.0624	2.198	21.57	0.169	0.836	1.142

Примечание. Расшифровка в тексте статьи.

**Таблица 2.** Аллометрические уравнения расчета фитомассы деревьев (кг на дерево) по таксационным характеристикам

Порода	Фракция фитомассы	Уравнение	Источник
Туранга разнолистная	Все	$0.0968 (D^2 H)^{0.807}$	(Сипович, 1963)
Лох остроплодный	Стволы	$0.3019 D^{1.733}$	(Loni et al., 2018)
	Крона	$0.05067 (\sum_i^3 D b_i^2)^{1.162}$	
	Корни	$0.25 Pha$	
Ива белая	Все	$0.0730 (D^2 H)^{0.870}$	(Давидов, 1962)

Обозначения: *D* – диаметр, см; *H* – высота, м; *Pha* – надземная фитомасса, кг.

связь между высотой и диаметром близка к прямо пропорциональной. Более высокие величины *B* означают, что с увеличением высоты диаметр растет быстрее (больше растет в ширину, чем в высоту).

Система САХР была применена к насаждениям туранги (*Populus diversifolia*) I и II бонитета (далее называемым соответственно “туранга в хороших условиях” и “в обычных условиях”), лоха остроплодного (*Elaeagnus orientalis*) и ивы белой (*Salix alba*). Аппроксимация параметров уравнений динамики таксационных характеристик (табл. 1) проведена на основе сведений из (Давидов, 1962; Муратчаева, 2014; Сипович, 1963) с учетом проектных планов по облесению долины р. Или, согласно которым начальная плотность лесных культур составляет, как правило, 2500 шт. га<sup>-1</sup>.

Нахождение параметров уравнений САХР (см. табл. 1) для рассматриваемых древесных пород позволило рассчитать динамику таксационных показателей на интервале возраста 0–30 лет. Полученные данные использованы для оценки фитомассы (в кг абсолютно сухого вещества) на основе аллометрических уравнений (табл. 2) из (Го-

робец и др., 2009; Уткин и др., 1996; Zhou et al., 2007).

Уравнения табл. 2 характеризуют фитомассу отдельного “среднего” дерева; для определения фитомассы насаждения значения, найденные по средней высоте и диаметру, были умножены на плотность и пересчитаны в т/га, для нахождения запаса углерода фитомассы использован коэффициент 0.5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Площади лесовосстановления.** На современном этапе невозможно установить, какую часть дельты занимали тугайные леса до начала ее активного освоения. На основании анализа сохранившихся лесов можно предположить, что лесопокрытая площадь была значительно больше, нежели сейчас. Для повышения эффективности водорегулирующей функции не менее 30% (FAO ..., 2018), т.е. 2460 км<sup>2</sup> от площади дельты в 8200 км<sup>2</sup> должны быть покрыты лесами. Тогда увеличение лесного покрова в дельте может привести к росту грунтового питания рукавов дельты

р. Или на 1.26–2.94 км<sup>3</sup>/год (до 21% годового стока реки) (Isurova, 2019), что приведет к дополнительному поступлению воды в оз. Балхаш.

В результате дешифрирования снимков было установлено, что только 5% дельты р. Или до сих пор покрыты лесами, а остальная незатопляемая ее часть была преобразована в лугопастбищные угодья. Местные жители полагают травянистые сообщества продуктивнее лесных и лесостепных. Кроме того, пасти скот на открытых пространствах проще, поэтому тугайные леса поджигались ежегодно для обеспечения простого способа перегона скота в нужном направлении на открытые места.

Соответственно, площадь планируемых посадок для обеспечения эффективной адаптации к изменениям климата составляет 200000 га. Северная часть старой дельты продолжает заливаться во время подъемов уровня оз. Балхаш, что позволило включить ее в зону, потенциально пригодную для лесовосстановления. В то же время некоторые участки непригодны или малопригодны для лесовосстановления. Они были выделены на основе дешифрирования мозаики цветных космических снимков Sentinel-2 (разрешение 10–20 м, ширина полосы съемки 290 м) за май 2018 г. (табл. 3, рис. 2). Помимо водных объектов (не

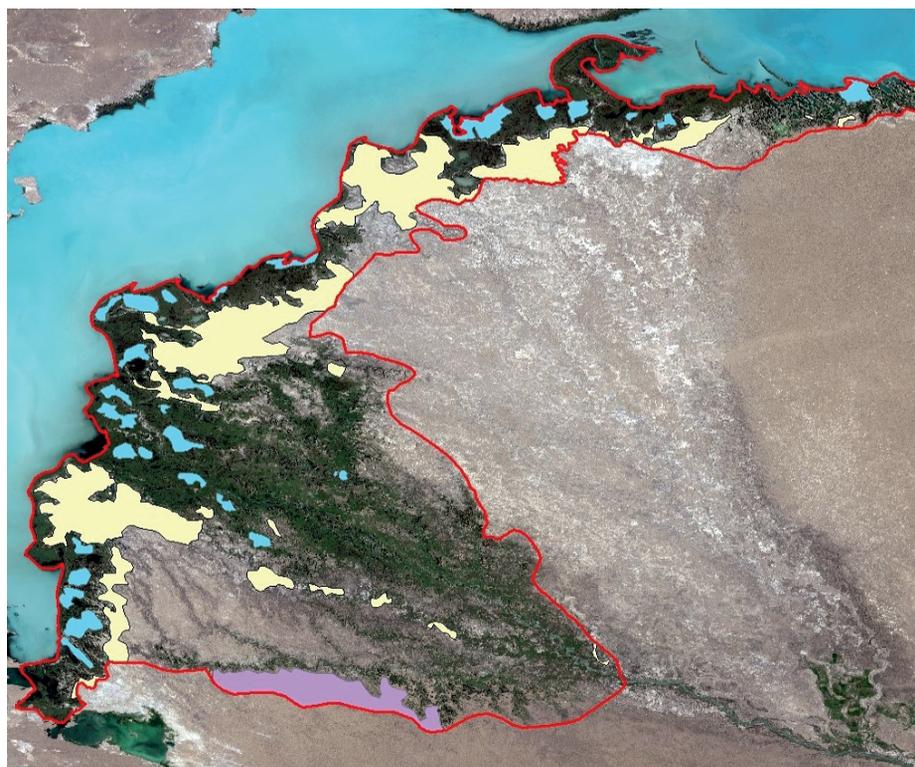
**Таблица 3.** Площади участков с различной степенью пригодности для лесовосстановления

Категория	Площадь, км <sup>2</sup>
Общая площадь территории	8200
Водные объекты (без учета расположенных на малопригодных землях)	1228
Сильно засоленные участки	1797
Переувлажненные участки	482
Левобережье р. Топар	314
Земли, наиболее пригодные для лесовосстановления	4377

приведены на рис. 2, так как большинство из них не выражаются в масштабе) были выделены переувлажненные участки, заливаемые в половодье на длительное время. Кроме того, для посадок малопригодны участки с мелкоконтурной мозаикой водоемов из-за технической трудности работы (см. рис. 2).

На территории дельты представлены три основных типа тугайных лесов:

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



**Рис. 2.** Участки, непригодные и малопригодные для лесовосстановления. Масштаб 1 : 1000000. Цветом выделены: светло-желтый – сильно засоленные участки, голубой – переувлажненные, светло-сиреневый – левобережье р. Топар. Красная линия – граница потенциально пригодной территории.

– лоховые, в которых лох восточный доминирует, а доля иных видов невелика;

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

Если ивовые тугайные леса занимают в экосистемах узкие полосы вдоль рек или озер с наибольшим увлажнением (около 10% площади), то туранговые занимают земли с лучшими почвами и средними условиями увлажнения, что составляет около 40% площади. Лоховые леса являются наименее требовательными к условиям произрастания и самыми распространенными, занимают около 50% пригодных площадей.

**Фонд посадочного материала.** Ива белая и лох восточный способны успешно размножаться черенкованием, что позволяет заготовить посадочный материал на месте или закупить его. Однако наиболее ценная порода – туранга разнолистная – в естественных условиях лучше всего размножается корневыми отпрысками, тогда как приживаемость черенков весьма невысока. Опыт размножения семенами ПРООН (2016) также показал низкую всхожесть семенного материала, а более перспективным – применение клонирования.

В качестве эксперимента 500 однолетних саженцев туранги разнолистной были высажены в дельте на 6 участках, с соблюдением равного соотношения деревьев клонального и семенного происхождения. Закладывались стандартные прямоугольные участки в несколько рядов с посадками на расстоянии 1 м в ряду и 2 м между рядами. При отсутствии ухода на малопригодных участках саженцы погибли (полностью на двух и 93% – на третьем), на средних по лесорастительным условиям сохранилось 32–38% саженцев, в оптимальных условиях – 88%. Для сравнения: посадки черенков ивы белой без дополнительного ухода дали результат 80–90% приживаемости.

Учитывая дороговизну получения саженцев путем клонирования, такой стандартный подход для крупномасштабного проекта по лесовосстановлению неприменим. Предпочтительными являются подходы садоводства, когда каждое дерево обеспечивается уходом хотя бы несколько первых лет, пока корневая система не достигнет насыщенных водой горизонтов. Высаживание деревьев на расстоянии 1–2 м является недопустимым расточительством, так как изначально создаются условия для высокого процента изреживания через несколько лет. Для лучшей приживаемости предпочтительна высадка двух- или трехлетних саженцев, на достаточном расстоянии друг от друга, с обеспечением дополнительного полива в засушливый период, с учетом рельефа местности, т.е. не на прямоугольных участках, а на вписанных в подходящие фрагменты фитокатен.

**Накопление углерода растущими лесными культурами.** В рамках климатических действий лесовосстановление воспринимается как процесс поглощения и накопления углерода, сведения о котором вносятся в национальный углеродный кадастр и улучшают показатели страны в отчетности РКИК ООН. Поэтому все лесные адаптационные проекты в обязательном порядке рассчитывают митигационный эффект.

Характер изменения углерода фитомассы для разных древесных пород сходен и соответствует линии, асимптотически приближающейся к предельному значению (рис. 3а). Однако конкретные параметры хода роста углерода фитомассы у разных пород заметно различаются. Ива белая к 30 годам достигает максимальных запасов углерода фитомассы 92.52 т С/га, далее следуют насаждения туранги в хороших условиях (64.85 т С/га), туранги в обычных условиях (51.43 т С/га) и лоха (15.61 т С/га). Древесные породы различаются и по времени наступления максимума поглощения углерода (рис. 3б). У лоха этот максимум приходится на 10 лет, у туранги в хороших условиях – на 13 лет, у ивы белой – на 15 лет, у туранги в обычных условиях – на 16 лет. Все рассматриваемые породы можно считать быстрорастущими, что способствует получению проектных результатов.

Приведенные на рис. 3 данные характеризуют накопление углерода в пуле фитомассы древостоя планируемых к созданию лесных насаждений. При осуществлении таких проектов рекомендуется учитывать накопление углерода в пулах крупных древесных остатков (КДО), подстилки и почвы (IPCC, 2003). Для пула мертвой древесины оценки могут быть получены расчетным образом на основе математической модели (Замолодчиков, 2009). Планируемые к облесению территории в настоящее время представляют собой лугопастбищные угодья с крайне низкими значениями запаса углерода в подстилке и мертвой древесине. После облесения наиболее вероятно увеличение размеров этих пулов, хотя мертвая древесина может использоваться местным населением как дрова.

Более сложным представляется вопрос об изменении запаса органического вещества почвы, особенно учитывая сопряженные с проектом изменения гидрологического режима. Актуальны результаты мета-анализа изменения запаса углерода почвы при облесении в аридных районах (Zhang et al., 2013), где показано, что эти запасы, как правило, увеличиваются в зависимости от времени после посадки, повышаясь на 15% за 10 лет, на 50% за 10–30 лет, на 96% за время, превышающее 30 лет. При осуществлении лесовосстановительного проекта будет необходимо организовать мо-

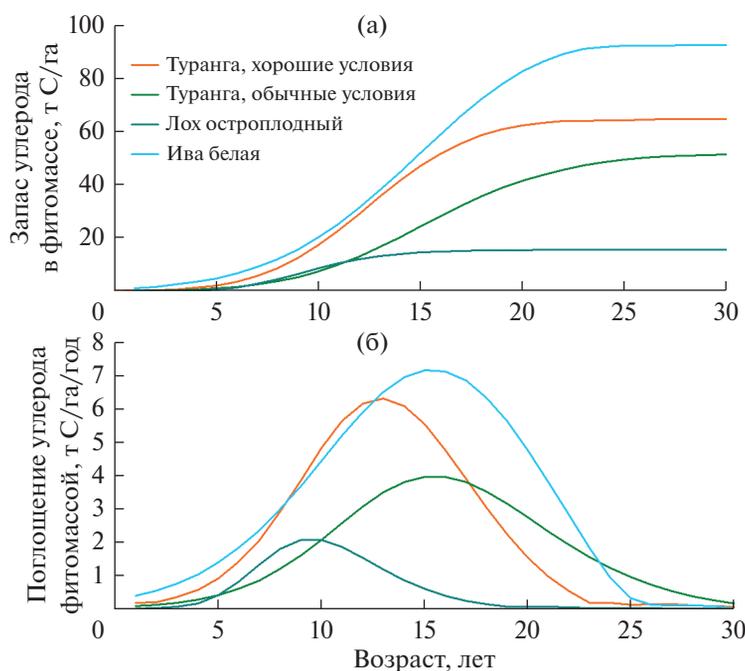


Рис. 3. Динамика запаса (а) и поглощения (б) углерода фитомассой лесных насаждений при лесовосстановлении в дельте р. Или.

нитинг пулов углерода в мертвом органическом веществе.

**Сценарии лесовосстановления.** Восстановление лесов на площади 200 000 га требует значительно-го времени. Для сравнения, на территории Казахстана ежегодно проводятся посадки лесных культур на площади более 60 000 га (Насынбаев, 2016). В течение нескольких первых лет саженцам требуется уход и дополнительный полив, защита от пожаров и от поедания домашним скотом.

Мероприятия по лесовосстановлению планируется осуществить за 12 лет. В течение предварительного года реализации проекта будут проведены все необходимые согласования, заложены питомники и построены теплицы. Согласно сценарию 1 (“максимум в середине”), посадки начинаются в первый год с площади 4000 га при одновременном завершении всех подготовительных задач. Уже на второй год площади увеличиваются до 12 000 га и достигают максимума на 7–8 год – 28 000 га. Затем предполагается снижение темпов до 4000 га в последний год. Так обеспечивается уход в течение нескольких лет для саженцев на максимальной площади (табл. 4).

Сценарий 2 (“максимум в конце”) предусматривает медленный старт проекта с 2600 га и его постепенное развитие по нарастающей. Тогда ближе к завершению удастся выйти на высокий уровень, соответствующий максимуму доступных ресурсов, – более 26 000 га в год (см. табл. 4). Для

обеспечения устойчивости нужно найти ресурсы для ухода за саженцами после завершения.

**Прогноз поглощения углерода при лесовосстановлении.** Динамика поглощения углерода фитомассой лесных насаждений имеет сходный характер для обоих сценариев (рис. 4б и 5б). Стартовые величины малы, составляя в первый год 0.3 (сценарий 1) и 0.2 (сценарий 2) тыс. т С. Затем следует постепенный рост до максимальных значений 511.5 (сценарий 1) и 507.8 (сценарий 2) тыс. т С в год. При реализации сценария 1 максимальное значение поглощения отмечается на 18-м году реализации проекта, а при сценарии 2 – на 20-м. Далее поглощение углерода снижается к 30-му году до 80.1 (сценарий 1) и 130.7 (сценарий 2) тыс. т С в год. Рост поглощения углерода в начальный период определяется двумя факторами: 1) увеличением площадей лесных культур по мере осуществления проекта, 2) приближением созданных лесных насаждений к максимальному приросту углерода фитомассы. Снижение поглощения углерода после 18-го либо 20-го года связано с тем, что к этому времени естественный максимум прироста фитомассы у созданных за первые 12 лет насаждений остается в прошлом.

Накопления углерода фитомассой древостоев к 10-му году проекта невелики и составляют 0.40 (сценарий 1) и 0.24 Мт С (рис. 4в и 5в). Это составляет всего лишь 5.7 и 3.4% от накоплений углерода к 30-му году проекта (7.03 и 6.88 Мт С соответственно). Накопления углерода по сцена-

**Таблица 4.** Сценарии темпов и площадей восстановления лесных культур в дельте р. Или

Год	Сценарий			
	1 “максимум в середине”		2 “максимум в конце”	
	темп, га/год	площадь, га	темп, га/год	площадь, га
1	4000	4000	2667	2667
2	12000	16000	5333	8000
3	16000	32000	8000	16000
4	16000	48000	10667	26667
5	20000	68000	13333	40000
6	24000	92000	16000	56000
7	28000	120000	18667	74667
8	28000	148000	21333	96000
9	20000	168000	24000	120000
10	16000	184000	26667	146667
11	12000	196000	26667	173333
12	4000	200000	26667	200000

рию 1 выше накоплений по сценарию 2 в 1.71 раза на 10-м годе и всего в 1.02 раза на 30-м годе проекта. Таким образом, различие сценариев посадки лесных культур сильно сказывается на первой трети осуществления проекта и практически нивелируется к его концу. Однако необходимо учитывать, что время фиксации результатов проекта в углеродных единицах может иметь большое значение при его поэтапной реализации.

Среднее за 30 лет поглощение углерода на территории восстановленных лесных насаждений в дельте р. Или составляет 1.17 (сценарий 1) и 1.15 (сценарий 2) т С/га/год. Аналогичная величина в нашей предварительной оценке проекта по лесовосстановлению в дельте р. Или составила 0.77 т С/га/год (Замолодчиков и др., 2020). Различие оценок связано, с одной стороны, со сменой конверсионно-объемного метода расчета запасов углерода в фитомассе на аллометрический, с другой – со сменой вида ивы на более продуктивный.

В 5 лесовосстановительных проектах в рамках механизма чистого развития, осуществляющихся в настоящее время в Китае на площадях от 2000 до 8671 га, за период 20 или 30 лет (Zhou et al., 2017), наименьшая величина 0.84 т С/га/год установлена для проекта по облесению во Внутренней Монголии, проводимого в аридных условиях. Остальные значения в диапазоне 2.61–3.52 т С/га/год найдены для проектов в провинциях Сычуань и Гуанси, расположенных в субтропической зоне и обладающих теплым и влажным климатом. Для проекта облесения, осуществляемого в Западной Австралии на площади 44000 га, среднее за 30 лет поглощение углерода оценивается в 0.20 т С/га/год

(Suganuma et al., 2012). Поглощение углерода за 40 лет культурами саксаула (*Haloxylon spp.*), созданными в Иране, составило 0.33 т С/га/год (Loni et al., 2018).

Проведенные сравнения позволяют заключить, что годовые поглощения фитомассой лесов, восстанавливаемых в субтропическом поясе, варьируют от 0.2 до 3.5 т С/га/год в зависимости от режима увлажнения. Величины поглощения углерода для проекта в дельте р. Или находятся в первой трети диапазона, что соответствует степени аридности региона.

Полученные оценки накопления углерода основываются на допущении, что созданные лесные насаждения не будут испытывать серьезных деструктивных воздействий, в частности, пожаров, катастрофических паводков, вспышек размножения насекомых-вредителей и пр. Разработанная система прогнозирования позволяет ввести учет нарушений через модификацию значений площадей либо параметров уравнений (в первую очередь густоты). Эта деятельность потребовала бы формирования набора сценариев нарушений с привлечением информации по историческим режимам нарушений, что не входило в задачи настоящей работы. Второе допущение состоит в том, что оценки роста лесных культур принимаются равными полученным в других регионах: для туранги – региона в бассейнах Сыр-Дарьи и Аму-Дарьи (Сипович, 1963), для ивы белой – в Херсонском районе Украины (Давидов, 1962), для лоха – на Терско-Кумской низменности (Муратчаева, 2014). Конечно, использование локальных данных по ходу роста древесных пород в пой-

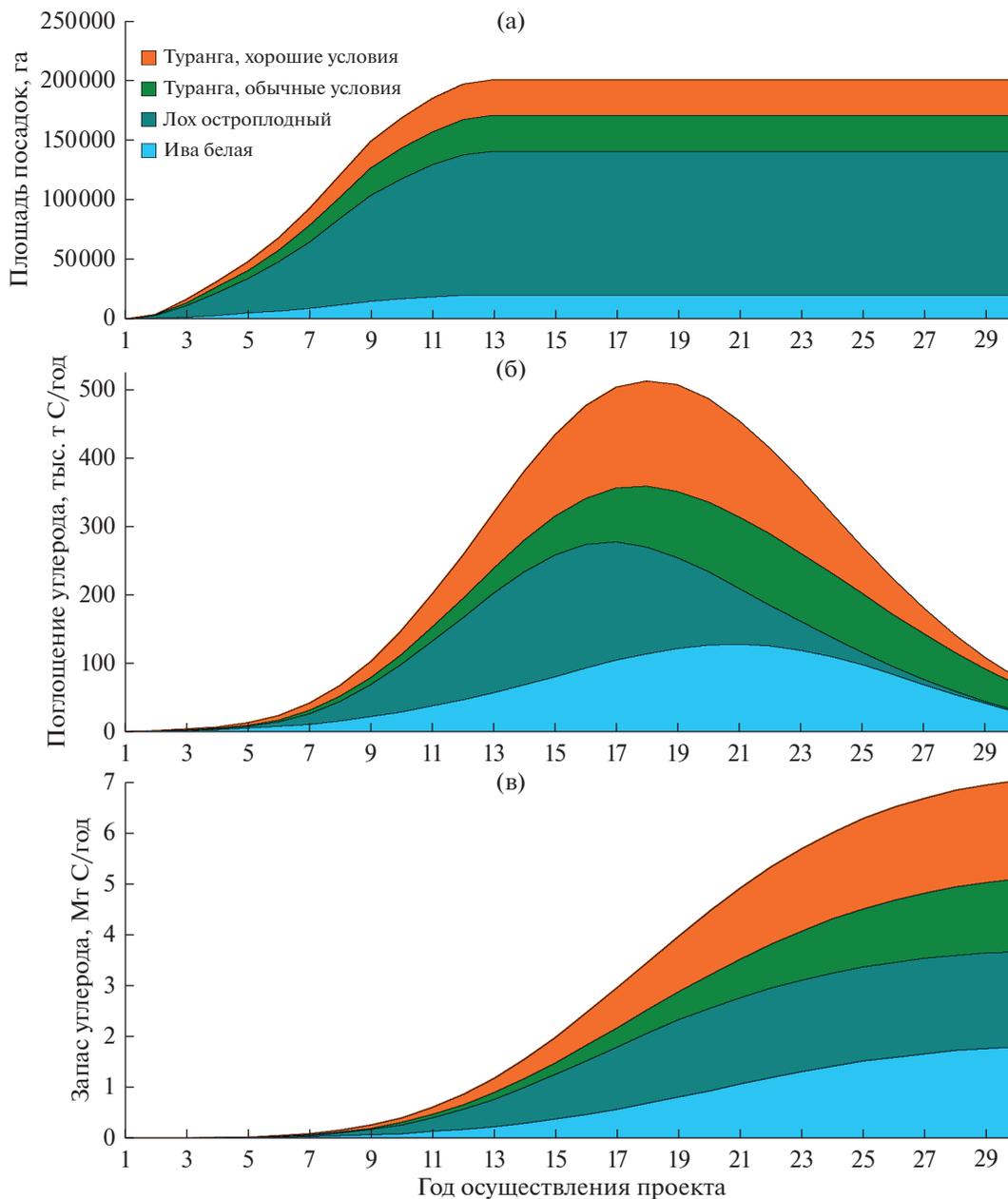


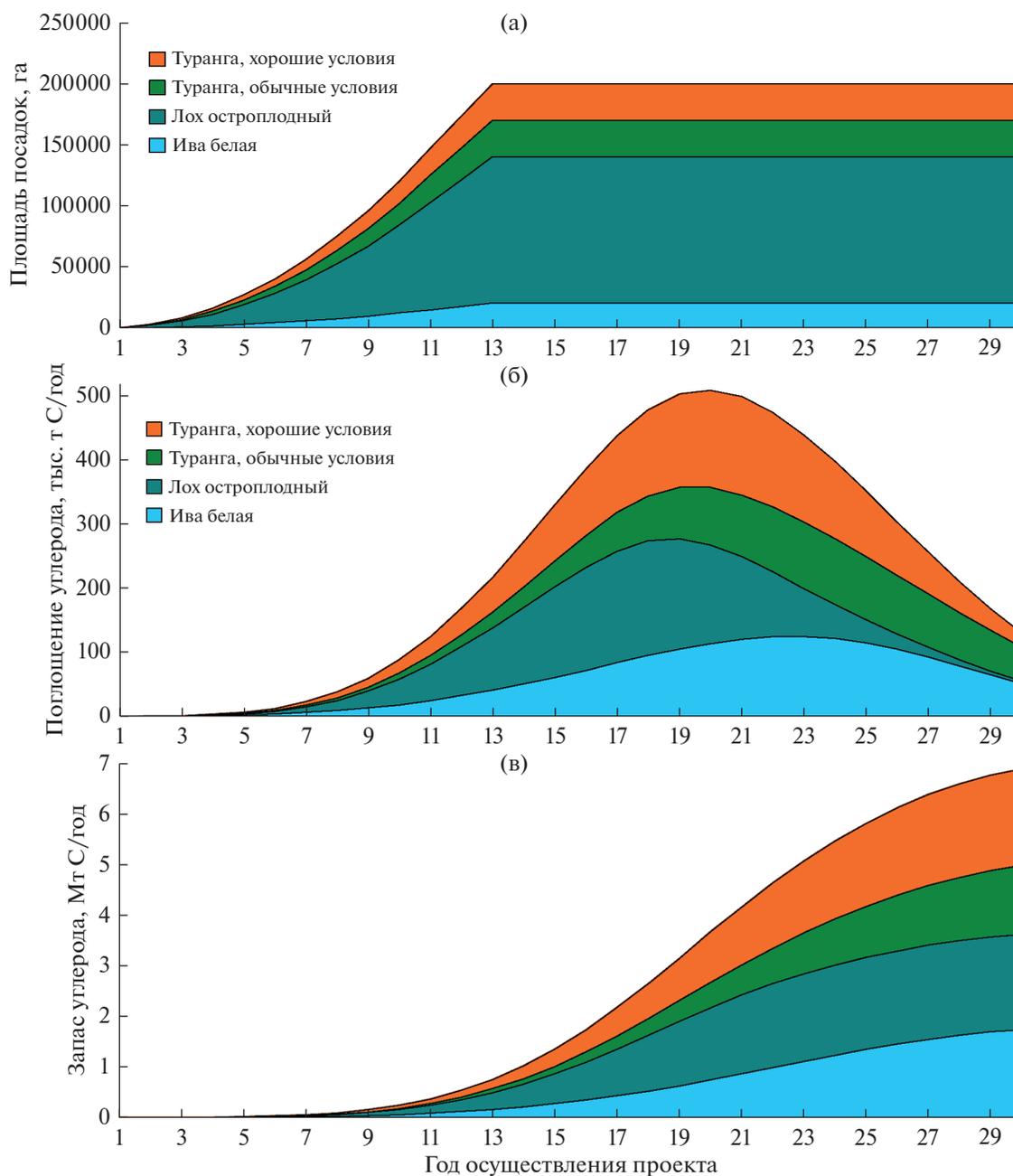
Рис. 4. Прогноз площадей облесения (а), годовичного поглощения (б) и накопления (в) углерода фитомассой древостоев при лесовосстановлении в дельте р. Или согласно сценарию 1 (“максимум в середине”).

ме р. Или могло бы существенно повысить качество прогноза.

**Воздействие лесовосстановления на гидрологию.** Восстановление тугайных лесов на некоторых участках в дельте р. Или может привести к неоднозначной реакции водотоков. С одной стороны, возрастет увлажненность участков вследствие изменения микроклимата, с другой — увеличится суммарное испарение в дельте в результате возрастания транспирации (по сравнению с существующими в настоящее время пирогенными травянистыми сообществами, в том числе —

тростниковыми) и испарения воды деревьями и, соответственно, несколько снизится сток.

Однако восстановленные тугайные леса усилят водорегулирующую роль дельты р. Или, способствующую поддержанию уровня грунтовых и поверхностных вод в сухой сезон или маловодные годы. В многоводный период древесная растительность в дельте усилит инфильтрацию воды в почвогрунты и будет способствовать задержанию речной воды в понижениях рельефа. Создание более влажного, прохладного микроклимата под



**Рис. 5.** Прогноз площадей облесения (а), годичного поглощения (б) и накопления (в) углерода фитомассой древостоев при лесовосстановлении в дельте р. Или согласно сценарию 2 (“максимум в конце”).

пологом деревьев будет предохранять почвы от сильного разогрева и пересыхания.

С точки зрения создания благоприятного микроклимата и предотвращения пыльных бурь является целесообразным восстановление саксауловых лесов на песках за пределами дельты р. Или, так как конденсационной влаги для них будет достаточно. В маловодный период, при котором питание реки осуществляется за счет подземных вод, дельта будет отдавать накопленную воду в рукава, озера или непосредственно в

оз. Балхаш с плоскостным стоком. Следовательно, увеличение лесопокрытой площади дельты повышает количество аккумулируемой воды, которая будет поддерживать уровень грунтовых и поверхностных вод.

## ВЫВОДЫ

Изменения климата на территории Казахстана, в том числе в Алматинской области и дельте р. Или, уже проявились достаточно отчетливо (с

1975 г.) и способствуют усилению аридизации климата. Эти изменения будут усиливаться при любом сценарии выбросов парниковых газов. 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, одной из которых является восстановление водорегулирующей функции дельты лесопосадками. Результаты проведенных исследований подтверждают эффективность и целесообразность мероприятия, если лесопосаженная площадь достигнет не менее 30% площади дельты, т.е. если лесовосстановление будет осуществлено на площади не менее 200000 га. Поддержание оптимальной степени залесенности 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 снижения уровня оз. Балхаш.

В работе охарактеризована новая расчетная методика, позволяющая осуществлять прогноз поглощения углерода пулом фитомассы создаваемых лесных культур при наличии отрывочных данных по динамике таксационных показателей. Найденные величины поглощения углерода фитомассой древостоя применяются к сценариям лесовосстановления, задающим темпы создания лесных культур по лесобразующим породам.

Согласно полученным прогнозам, лесовосстановление в дельте р. Или на площади 200000 га приведет в течение 30 лет к накоплению фитомассой древостоев 7 Мт С, что соответствует удельному поглощению 1.15 т С/га/год. По этой величине рассматриваемый проект превосходит поглощение углерода при лесовосстановлении и облесении аридных регионов (0.2–0.8 т С/га/год). Приведенное сравнение подтверждает, что митигационный эффект проекта вполне достаточен, чтобы обладать самостоятельной ценностью.

Подход, основанный на комплексной оценке различных воздействий, определении их вклада и связанности с изменением климата, с выявлением необходимых адаптационных мер, может быть использован в качестве методической основы для разработки проектов по адаптации к изменениям климата с использованием регулирующих функций лесов в других регионах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работы выполнены при поддержке WWF России (дистанционное зондирование и пр.), тем госзадания № АААА-А20-120070990079-6 ФГБУ «ИГКЭ» и № АААА-А18-118052590019-7 ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (прогнозные расчеты) и проекта Российского научного

фонда № 19-77-30015 (поглощение углерода лесными культурами).

#### FUNDING

The research was carried out with the support of WWF Russia (remote sensing analysis, glaciers, and hydrology), within the framework of the state-ordered research themes no. АААА-А20-120070990079-6 of the Izrael Institute of Global Climate and Ecology and no. АААА-А18-118052590019-7 of the Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (forecast calculations), and with the financial support of the Russian Science Foundation, project no. 19-77-30015 (carbon sequestration by forest plantations).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас мирового водного баланса. М.—Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 65 с.
- Байкенова Г.Г., Выхина А. Экологические проблемы озера Балхаш // Экологические проблемы региона и пути их разрешения. Май 2018. С. 256–260.
- Галаева А.В. Изменение стока реки Или на участке от гидрометрического створа 164 км выше Капшагайской ГЭС до урочища Капшагай // Вестн. КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 93–95.
- Горобец А.И., Таранков В.И., Сизых В.Н. Сравнительная оценка углерододепонирующей и кислород продуцирующей функций дубравы и ветляника // Лесной вестник. 2009. № 3. С. 43–48.
- Давидов М.В. Рост и продуктивность насаждений ветлы (*Salix alba* L.) // Изв. ВУЗов. Лесной журн. 1962. № 5. С. 9–14.
- Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Ледники / Природа Мира. М.: Мысль, 1989. 447 с.
- Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
- Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Липка О.Н. Потенциальное поглощение углерода фитомассой древостоя при восстановлении тугайных лесов // Лесоведение. 2020. № 2. С. 115–126.
- Казгидромет. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2017 год. Астана, 2018. 60 с.
- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
- Муратчаева П.М.-С. Мониторинг состояния древесных пород в искусственных насаждениях Терско-Кумской низменности // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 1 (58). С. 39–44.
- Насынбаев Е. Вокруг Астаны будет применен китайский опыт лесопосадок на засоленных землях // Today.kz от 2016-05-30. <http://today.kz/news/zhizn/2016-05-30/718441-vokrug-astany-budet-primenen-kitajskij-opyit-lesoposadok-na-zasolennyih-zemlyah/> (дата обращения 08.07.2020).
- Попова В.П., Шиварева С.П., Домран А.О. Водный баланс озера Балхаш за период с 2000 по 2009 годы //

- Гидрометеорология и экология. 2010. № 4. С. 92–100.
- ПРООН. Атлас функционального зонирования Балхашского района Алматинской области. Астана, 2016. 64 с.
- Седьмое национальное Сообщение и третий двухгодичный Доклад Республики Казахстан Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Астана, 2017. 304 с. [http://sustainable.eep.kz/upload/RUS\\_Saulet\\_Report\\_12-2017\\_RUS.pdf](http://sustainable.eep.kz/upload/RUS_Saulet_Report_12-2017_RUS.pdf) (дата обращения 08.07.2020).
- Сипович В.В. Исследование хода роста туранговых насаждений // Изв. ВУЗов. Лесной журн. 1963. № 2. С. 27–29.
- Стародубцев В.М., Трускавецкий С.Р. Процессы опустынивания в дельте реки Или под воздействием антропогенной нагрузки // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 2. С. 248–251.
- Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36–46.
- Шиварева С.П., Галаева А.В. Анализ изменения стока в бассейне р. Или в пределах Казахстана и Китая в связи с климатическими изменениями // Гидрометеорология и экология. 2014. № 1. С. 68–80.
- FAO, UNECE. Forests and Water Valuation and payments for forest ecosystem services. Geneva, 2018. 108 p.
- Guo L., Xia Z. Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin // Theor. Appl. Climatol. 2014. Vol. 115. P. 219–229. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0883-3>
- Ili River Delta and South Lake Balkhash / Ramsar Sites Information Service, 2012. <https://rsis Ramsar.org/ris/2020> (дата обращения 08.07.2020).
- Information Sheet on Ramsar Wetlands (RIS). 2009–2012 ver. Ili River Delta and South Lake Balkhash (Дельта реки Или и южная часть озера Балхаш). Date this sheet was completed/updated. May 16, 2011. <https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/KZ2020RIS.pdf> (дата обращения 08.07.2020).
- IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglucf/gpoglucf\\_languages.html](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglucf/gpoglucf_languages.html) (дата обращения 08.07.2020).
- IPCC 2019: 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.). <https://www.ipcc.ch/srccl/> (дата обращения 14.05.2021).
- Isupova M.V. 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 Res. 2019. Vol. 46. Suppl. 1. P. S29–S42.
- Loni A., Radnezhad H., Martynova-Van Kley A., Hassavand A., Sadeghi M., Zaremanesh H. The role of *Haloxylon* plantations in improving carbon sequestration potential of sand dunes of Iran // Applied Ecol. and Environ. Res. 2018. Vol. 16 (1). P. 321–333.
- Suganuma H., Ito T., Tanouchi H., Egashira Y., Kurosawa K., Kojima T. Estimation of carbon sequestration potential of arid land afforestation using satellite image analysis and ground truth // J. Arid Land Stud. 2012. Vol. 22. № 1. P. 69–72.
- Zhang Y.-Q., Liu J.-B., Jia X., Qin S.-G. Soil organic carbon accumulation in arid and semiarid areas after afforestation: a meta-analysis // Pol. J. Environ. Stud. 2013. Vol. 22. № 2. P. 611–620.
- Zhou W., Gong P., Gao L. A review of carbon forest development in China // Forests. 2017. Vol. 8: 295. <https://doi.org/10.3390/f8080295>
- Zhou X., Brandle J.R., Schoeneberger M.M., Awada T. Developing above-ground woody biomass equations for open-grown, multiple-stemmed tree species: Shelterbelt-grown Russian-olive // Ecol. Modelling. 2007. Vol. 202. № 3–4. P. 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.10.024>

## Climate Effect of the Ili Delta Reforestation

O. N. Lipka<sup>1,\*</sup>, D. G. Zamolodchikov<sup>2</sup>, V. V. Kaganov<sup>2</sup>, G. A. Mazmanians<sup>3</sup>,  
M. V. Isupova<sup>4</sup>, and A. A. Aleinikov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*WWF Russia – Central Asian Programme, Almaty, Kazakhstan*

<sup>4</sup>*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>5</sup>*SKANEKS GROUPS, Moscow, Russia*

\*e-mail: [olipka@mail.ru](mailto:olipka@mail.ru)

The scientific rationale for ecosystem-based adaptation projects is comprehensive. This work considers a set of measures aimed at preserving the ecosystems of Lake Balkhash and the Ili River that are vulnerable to current climate change. Adaptation activities, in particular, the restoration of tugai forests, are designed to increase the water-regulating and environmental-forming functions of the Ili River Delta, which will increase the stabilization of the water regime of Lake Balkhash and the resilience of its ecosystems to any climate

change scenarios in the region. In addition, forest plantations will accumulate carbon in pools of phytomass, deadwood, litter, and soil. The paper describes the calculation methodology, which makes it possible to predict carbon uptake by the pool of phytomass of the planted forests using fragmentary data on the dynamics of taxation indicators. The obtained values of carbon absorption by the tree phytomass are applied to reforestation scenarios that set the rate of reforestation by tree species. According to the forecasts received, reforestation in the Ili River Delta on the area of 200 thous. ha over 30 years will lead to the accumulation of 7 Mt C by tree phytomass, which corresponds to a normalized absorption of 1.15 t C/ha/year. The mitigation effect of the project is quite sufficient to have independent value.

**Keywords:** climate change, ecosystem-based adaptation, Lake Balkhash, Ili River Delta, reforestation, tree phytomass, carbon sequestration, forecast analysis, climate projects

## REFERENCES

- Atlas funktsional'nogo zonirovaniya Balkhashskogo raiona Almatinskoi oblasti* [Atlas of Functional Zoning of the Balkhash District of the Almaty Region]. Astana: PROON, 2016. 64 p.
- Atlas mirovogo vodnogo balansa* [The Atlas of World Water Balance]. Moscow–Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 65 p.
- Baikenova G.G., V'yukhina A. Ecological problems of Lake Balkhash. In *Ekologicheskie problemy regiona i puti ikh razresheniya* [Ecological Problems of the Region and Ways to Solve Them]. Omsk: Omsk. Gos. Tekhn. Univ., 2018, pp. 256–260. (In Russ.).
- Davidov M.V. Growth and productivity of the plantations of the willow (*Salix alba L.*). *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Lesnoi Zh.*, 1962, no. 5, pp. 9–14. (In Russ.).
- Dolgushin L.D., Osipova G.B. *Ledniki* [Glaciers]. Moscow: Mysl' Publ., 1989. 447 p.
- Ezhгодnyi byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana: 2017 god* [Annual Bulletin of the Monitoring of the Climate State and Change in Kazakhstan: 2017]. Astana: Kazgidromet, 2018. 60 p.
- Forests and Water Valuation and Payments for Forest Ecosystem Services*. Geneva: FAO, UNECE, 2018. 108 p.
- Galaeva A.V. Change in the flow of the Ili River in the section from the gauging section 164 km upstream of the Kapshagai hydroelectric power station to the Kapshagai valley. *Vestn. KRSU*, 2014, vol. 14, no. 7, pp. 93–95. (In Russ.).
- Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC, 2003. Available at: [https://www.ipcc-ghnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf\\_lan-guages.html](https://www.ipcc-ghnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_lan-guages.html) (accessed: 08.07.2020).
- Gorobets A.I., Tarankov V.I., Sizykh V.N. Comparative assessment of carbon sequestration and oxygen-producing functions of oak and willow. *Lesnoi Vestn.*, 2009, no. 3, pp. 43–48. (In Russ.).
- Guo L., Xia Z. Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin. *Theor. Appl. Climatol.*, 2014, vol. 115, pp. 219–229. doi 10.1007/s00704-013-0883-3
- Ili River Delta and South Lake Balkhash. Ramsar Sites Information Service, 2012. Available at: <https://rsis.ramsar.org/ris/2020> (accessed: 08.07.2020).
- Information Sheet on Ramsar Wetlands (RIS) – 2009–2012 version. Ili River Delta and South Lake Balkhash. Date this sheet was completed/updated: May 16, 2011. Available at: <https://rsis.ramsar.org/ris/2020> (accessed: 08.07.2020).
- IPCC *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*. Shukla P.R., Skea J., CalvoBuendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J., Eds. 2019. Available at: <https://www.ipcc.ch/srccl/> (accessed: 14.05.2021).
- Isupova M. V. 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 Resour.*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. S29–S42.
- Loni A., Radnezhad H., Martynova-Van Kley A., Hassavand A., Sadeghi, M., Zaremanesh H. The role of *Haloxylon* plantations in improving carbon sequestration potential of sand dunes of Iran. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 2018, vol. 16 (1), pp. 321–333.
- Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [River Mouths of Russia and Neighboring Countries: Past, Present, and Future]. Moscow: GEOS Publ., 1997. 413 p.
- Muratchaeva P.M.-S. Monitoring of growth and condition of tree species in artificial plantings of Terek-Kuma lowland. *Arid. Ekosist.*, 2014, vol. 20, no. 1 (58), pp. 39–44. (In Russ.).
- Nasynbaev E. The chinese experience of forest planting on saline lands will be applied around Astana. Today.kz, 30 May, 2016. Available at: <http://today.kz/news/zhizn/2016-05-30/718441-vokrug-astanyi-budet-primenen-kitajskij-opyit-lesoposadok-na-zasolennyih-zemlyah/> (accessed: 08.07.2020). (In Russ.).
- Popova V.P., Shivareva S.P., Domran A.O. The water balance of Lake Balkhash for the period from 2000 to 2009. *Gidrometeorol. Ekol.*, 2010, no. 4, pp. 92–100. (In Russ.).
- Sed'moe natsional'noe Soobshchenie i tretii dvukhgodichnyi Doklad Respubliki Kazakhstan Ramochnoi 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]. Astana, 2017. 302 p. Available at: [http://sustainable.eep.kz/upload/RUS\\_Saulet\\_Report\\_12-2017\\_RUS.pdf](http://sustainable.eep.kz/upload/RUS_Saulet_Report_12-2017_RUS.pdf) (accessed 08.07.2020). (In Russ.).

- Shivareva S.P., Galaeva A.V. Analysis of runoff changes in the Ili River Basin on the territory of Kazakhstan and China due to climate change. *Gidrometeorol. Ekol.*, 2014, no. 1, pp. 68–80. (In Russ.).
- Sipovich V.V. Study of the turanga plantations growth rate. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Lesnoi Zh.*, 1963, no. 2, pp. 27–29. (In Russ.).
- Starodubtsev V.M., Truskavetskiy S.R. Desertification processes in the Ili River delta under anthropogenic pressure. *Water Resour.*, 2011, vol. 38, pp. 253. doi 10.1134/S0097807811010167
- Suganuma H., Ito T., Tanouchi H., Egashira Y., Kurosawa K., Kojima T. Estimation of carbon sequestration potential of arid land afforestation using satellite image analysis and ground truth. *J. Arid Land Stud.*, 2012, vol. 22, no. 1, pp. 69–72.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I. Allometric equations for phytomass according to pine, spruce, birch and aspen trees in the European part of Russia. *Lesovedenie*, 1996, no. 6, pp. 36–46. (In Russ.).
- Zamolodchikov D.G. Assessment of the carbon pool of large wood residues in the forests of Russia, taking into account the effects of fires and logging. *Lesovedenie*, 2009, no. 4, pp. 3–15. (In Russ.).
- Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Lipka O.N. Potential carbon absorption by tree-stand phytomass in the course of tugai forest restoration. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2020, vol. 13, pp. 720–729. doi 10.1134/S1995425520070148
- Zhang Y.-Q., Liu J.-B., Jia X., Qin S.-G. Soil organic carbon accumulation in arid and semiarid areas after afforestation: a meta-analysis. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 611–620.
- Zhou W., Gong P., Gao L. A review of carbon forest development in China. *Forests*, 2017, vol. 8, pp. 295. doi 10.3390/f8080295
- Zhou X., Brandle J.R., Schoeneberger M.M., Awada T. Developing above-ground woody biomass equations for open-grown, multiple-stemmed tree species: Shelterbelt-grown Russian-olive. *Ecol. Model.*, 2007, vol. 202, nos. 3–4, pp. 311–323. doi 10.1016/j.ecolmodel.2006.10.024