

Прогнозная оценка поглощения углерода при восстановлении тугайных лесов

© 2019. Д. Г. Замолодчиков¹, д. б. н., г. н. с., В. В. Каганов¹, н. с.,
О. Н. Липка², к. г. н., координатор проектов,

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14,

²Всемирный фонд дикой природы (WWF России),
109240, Россия, г. Москва, ул. Николоямская, д. 19, стр. 3,
e-mail: dzamolod@mail.ru

Дана прогнозная оценка углеродного эффекта от облесения части площадей дельты р. Или (Казахстан) в рамках проекта по восстановлению тугайных лесов и реинтродукции туранского тигра. Рассчитаны типовые поглощения углерода фитомассой древостоя по древесным породам, характерным для рассматриваемой территории (туранга разнолистная, лох остроплодный, ивы Вильгельмса и джунгарская). Дан прогноз поглощения углерода фитомассой древостоев на 30 лет при лесовосстановлении, осуществляемом на площади 200 тыс. га. Величина поглощения углерода возрастает от 2 тыс. т С/год в первый год до максимальных 264 тыс. т С/год на 16-м году осуществления проекта, затем снижается до 101 тыс. т С/год к 30-му году. Суммарное накопление углерода в фитомассе за 30 лет составит 4,63 млн т С (16,98 млн т CO₂).

Ключевые слова: лесовосстановление, тугайные леса, фитомасса, поглощение углерода, прогнозирование.

Projection of carbon sequestration in riparian reforestation

© 2019. D. G. Zamolodchikov¹ ORCID: 0000-0002-2466-9003²

V. V. Kaganov¹ ORCID: 0000-0003-2593-2755³, O. N. Lipka² ORCID: 0000-0003-4020-2419⁴

¹Center for Ecology and Productivity of Forests RAS,
bldg. 14, 84/32, Profsovnaya St., Moscow, Russia, 117997,

²World Wildlife Fund (WWF Russia),
bldg. 3, 19, Nikoloyamskaya St., Moscow, Russia, 109240,
e-mail: dzamolod@mail.ru

The projection of carbon effects from partial reforestation of delta of the Ili river (Kazakhstan) in frame of project on restoration of riparian forests and reintroduction of Caspian tiger is developed. Typical values of carbon sequestration by biomass of stands are calculated for tree species, native at studied area (*Populus diversifolia* Schrenk, *Elaeagnus oxycarpa* Schltld., *Salix songarica* Andersson, *S. wilhelmsiana* M. Bieb.). The *P. diversifolia* stands are subdivided to good and normal conditions, *S. songarica* and *S. wilhelmsiana* are combined to *Salix* sp. group. The peculiarities of growth of carbon in biomass differ in high extent between different tree species. The rate of carbon accumulation during starting 5 years after planting is close for *P. diversifolia* at good conditions (0.71 ton C/(ha • year)) and *E. oxycarpa* (0.69 ton C/(ha • year)). The same values are lower for *P. diversifolia* at normal conditions (0.32 ton C/(ha • year)) and *Salix* sp. (0.06 ton C/(ha • year)). *P. diversifolia* at good conditions after 30 years has 54.05 ton C/ha in biomass, at normal conditions – 43.71 ton C/ha, then *Salix* sp. (31.10 ton C/ha) and *E. oxycarpa* (12.44 ton C/ha) follow. The carbon sequestration is projected for 30 years with reforestation performed at area of 200 thous. ha. This area is subdivided by tree species as follow: *P. diversifolia* at good conditions – 15%; *P. diversifolia* at normal conditions – 15%; *E. oxycarpa* – 60%; *Salix* sp. – 10%. The total area will be completely planted during 12 years with equal annual rates 8.3%, correspondent to 16677 ha per year. The annual sequestration is increased from 2 thous. ton C/year at first year of project to maximal 264 thous. ton C/year at 16th year of project rolling, then is decreased to 101 thous. ton C/year at 30th year. Total accumulation of carbon by stand biomass during 30 years is 4.63 mln ton C (16.98 million tons of CO₂). The carbon accumulation is important component of ecosystem services, which can be restored due to the project implementation.

Keywords: reforestation, riparian forests, phytomass, carbon sequestration, projection.

На территории Республики Казахстан в 2018 г. был образован новый государственный природный резерват «Иле-Балхаш», к которому примыкают заказники «Караойский» и «Прибалхашский». Основной целью создания данной особо охраняемой природной территории (ООПТ) является обеспечение базы для реинтродукции исчезнувшего вида – туранского тигра, который вымер на территории Казахстана в конце 40-х годов XX века [1]. Первоочередной задачей в преддверии восстановления популяции тигра является восстановление его местообитаний. Естественные тугайные экосистемы, представляющие собой сочетания лесных, кустарниковых и травянистых сообществ, претерпели значительные антропогенные изменения. Так, площадь лесов в дельте р. Или в настоящее время составляет всего 5%, тогда как в ненарушенном состоянии большая часть дельты, которая не покрыта водой, облесена. Лесные насаждения должны стать экологическим каркасом ООПТ. Благодаря водорегулирующей функции лесов на территории дельты, подземный сток р. Или усилится, также увеличится меженный сток, что особенно важно в маловодные годы для поддержания уровня озера Балхаш выше критической отметки 341 м над уровнем моря. Обеспечение лучшей среды обитания позволит повысить устойчивость и продуктивность экосистем резервата и примыкающих к нему заказников, что создаст условия для успешного восстановления популяции тигра. В дополнение к этим функциям лесные насаждения будут являться инструментом долговременного закрепления атмосферного углерода. В ходе своего роста и развития древесная растительность способна активно поглощать атмосферный углерод, переводя его в фитомассу живых деревьев. Впоследствии углерод фитомассы перераспределяется в пулы сухостоя (мёртвых деревьев, остающихся на корню), валежа (крупных древесных остатков) и лесной подстилки. Часть поглощённого деревьями и травянистой растительностью углерода закрепляется в почвенном гумусе.

Для оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий в углеродном аспекте на территории резервата необходимо провести расчёт поглощения атмосферного углерода и дать прогнозную оценку масштабов и скорости данного процесса. Для решения данной задачи, с одной стороны, необходимо определение потенциального поглощения углерода (в расчёте на единицу площади) планируемыми к созданию лесными насаждениями, с другой, –

формирование сценария лесовосстановительных мероприятий, включая величины площадей под разными древесными породами, темпы их освоения, продолжительность периода мониторинга накоплений углерода (C). Конечным результатом должна стать оценка изменений в поглощении и накоплениях углерода на территории проекта.

Цель настоящей работы – прогнозная оценка поглощения углерода при осуществлении проекта по восстановлению тугайных лесов в долине р. Или (Казахстан).

Объекты и методы

Основные породы, которые будут использоваться для лесовосстановительных работ на территории проекта, представлены турангой разнолистной (*Populus diversifolia* Schrenk), лохом остроплодным (*Elaeagnus oxycarpa* Schldl.), ивы джунгарской (*Salix songarica* Andersson) и Вильгельмса (*Salix wilhelmsiana* M. Bieb.). При выполнении лесовосстановительного проекта принято отказаться от использования интродуцированных видов древесных растений, чтобы создаваемые насаждения соответствовали критериям консервации генетических ресурсов лесов *in situ* [2]. Чтобы выполнить прогнозные расчёты накопления C, требуются сведения по ходу роста насаждений указанных древесных пород. Характеристика хода роста туранги разнолистной была осуществлена по данным работы [3], где приводятся таблицы хода роста туранги для ряда классов бонитета, которые могут быть сопоставлены с различными вариантами условий произрастания: хорошими и обычными. В таблицах хода роста стартовый возраст составлял 12–15 лет, однако для углеродных проектов большое значение имеют начальные годы осуществления. При аппроксимации начальных стадий роста туранговых насаждений авторы исходили из линейной зависимости для средней высоты и среднего диаметра, полиномиальной для густоты. Затем, с использованием видовых чисел были рассчитаны величины запасов древесины для возрастов от 1 до 11–14 лет. Результаты полевых обследований территории, проведённых в октябре 2018 г. в местах планируемого осуществления проекта (Алматинская обл. Республики Казахстан), показали высокую степень сопоставимости таблиц хода из использованного источника [3]. Это даёт основание считать вполне корректным использование указанного источника для проведения прогнозных расчётов поглощения

углерода при осуществлении посадок туранги разнолистной.

Имеющиеся в литературе сведения для лоха остроплодного характеризуют лишь динамику средней высоты и диаметра без густоты и запаса древесины. Расчёты были проведены на основе сведений по динамике средней высоты в культурах лоха узколистного [4], а также данным натурных измерений, согласно результатам которых запас стволовой древесины в типичных тугайных насаждениях лоха составляет около 15 м³/га при средней высоте деревьев 5 м. На основе совокупности всей доступной информации были восстановлены динамика средней высоты, среднего диаметра, густоты и запаса древесины лоха узколистного для интервала возраста 1–30 лет.

Информация по таксационным характеристикам ив джунгарской и Вильгельмса на текущий момент в литературе обнаружена не была. Поэтому для восстановления динамики таксационных характеристик были использованы данные по иве ломкой, произрастающей в аридных регионах [5, 6]. Результаты полевых обследований осенью 2018 г. в пойме р. Или показывают, что максимальная высота ивовых насаждений составляет около 7 м. Динамика роста ивы ломкой в высоту была скорректирована с учётом указанной величины, далее были проведены расчёты динамики таксационных характеристик для интервала возраста 1–30 лет. В силу ограниченности исходной информации как для ив, так и для лоха не удалось провести дополнительную дифференциацию по условиям местопроизрастания.

Основой для определения объёмов накопления С насаждениями, предлагаемыми для проекта, является рекомендованный руководством Межправительственной группы экспертов по изменению климата конверсионный подход [7], который заключается в том, что запасы стволовой древесины, получаемые в ходе инвентаризации лесных насаждений, пересчитываются в массу С с использованием конверсионных коэффициентов. Поскольку фракции корней, ветвей и листвы имеют функциональную связь со стволовой фракцией, их расчёт также может быть произведён конверсионным методом. Для насаждений туранги и ивы возраста 1–20 лет используется конверсионный коэффициент 0,356 т С/м³, для возраста 21–30 лет – 0,363 т С/м³, для лоха остроплодного – 0,624 т С/м³. Указанные значения известны для групп древесных пород «прочие мяг-

колиственные» (0,356; 0,363 т С/м³) и «прочие твёрдолиственные» (0,624 т С/м³) [8].

Для выполнения расчёта поглощения С на территории проекта необходим сценарий посадок лесных культур. Вся территория, планируемая для облесения, должна быть разделена на части, соответствующие посадкам разных пород: туранги, лоха и ивы. Площади, которые запланированы под насаждения туранги разнолистной, были подразделены на части с хорошими и типичными условиями лесопригодности. Для последующего расчёта поглощения углерода было создано программное обеспечение в виде таблиц Microsoft Excel, реализующих следующий алгоритм расчёта: с величиной площади выбранного варианта лесной культуры сопоставляется величина поглощения в первый год после посадки и вычисляется их произведение. Во второй год с той же площадью сопоставляется величина поглощения за второй год, и снова по произведению оценивается суммарное поглощение. Сумма рассчитанных поглощений за все годы осуществления лесовосстановительных мероприятий в рамках проекта даёт величину С, аккумулированного в фитомассе данного типа лесного насаждения.

Программная версия алгоритма обеспечивает расчёт поглощения С вновь созданными лесными культурами на протяжении 30 лет. Для культур, созданных в первый год осуществления проекта, поглощение рассчитывается по каждому из 30 лет осуществления проекта. У насаждений, созданных во второй или последующие годы проекта, поглощение рассчитывается для периода, равного 31 год минус порядковый номер года посадки данного насаждения. Сумма по всем вариантам лесных культур разного времени создания и по всем годам проекта даёт суммарное количество С, накопленного за время осуществления проекта.

Результаты и обсуждение

Установлено, что характер изменения С фитомассы для разных древесных пород сходен и соответствует линии, асимптотически приближающейся к предельному значению (рис. 1). Однако конкретные параметры хода роста С фитомассы у разных пород заметно различаются. Туранга в хороших условиях к 30 годам достигает запаса С фитомассы 54,05 т С/га, в обычных условиях – 43,71 т С/га, далее следуют насаждения ивы (31,10 т С/га) и лоха (12,44 т С/га). При этом по скорости

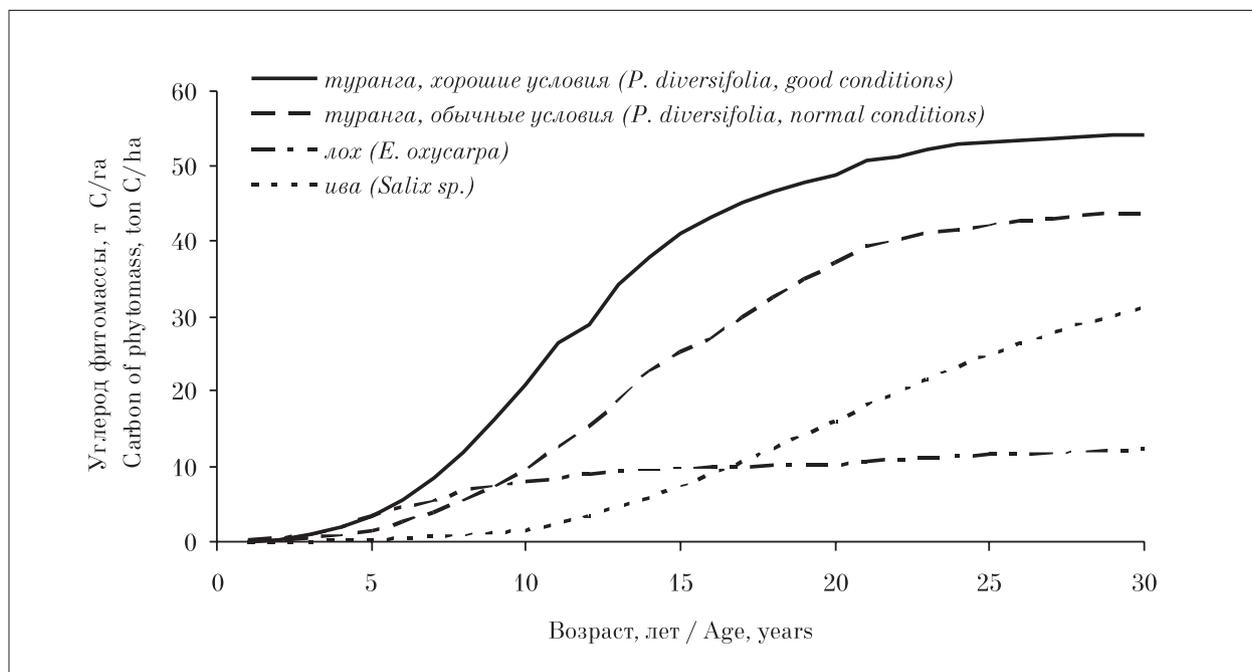


Рис. 1. Динамика запаса углерода фитомассы в насаждениях при лесовосстановлении в долине р. Или
Fig. 1. Dynamics of the carbon reserve in phytomass of stands during reforestation in the Ili river valley

накопления С в первые 5 лет после посадки лох (0,69 т С/(га · год)) близок к туранге в хороших условиях (0,71 т С/(га · год)) значительно превосходит турангу (0,32 т С/(га · год)) и иву (0,06 т С/(га · год)) в обычных условиях. Более высокая эффективность накопления С посадками лоха за первые 2 года в сравнении с топодем и вязом отмечена в экспериментально-полевой работе [9].

Расчёт поглощения С при осуществлении проекта восстановления тугайных лесов в долине р. Или базируется на следующих исходных данных. Общая площадь земель, пригодных для облесения, принята равной 200000 га. Данная площадь распределяется по породам следующим образом: туранга в хороших условиях – 15%, туранга в обычных условиях – 15%, лох – 60%, ива – 10%. Предполагается равномерное освоение площадей под посадки в течение 12 лет по 8,3% за год, что соответствует 16677 га лесопосадок за год (рис. 2). Представленные планы по устройству лесных насаждений весьма масштабны, однако их реалистичность в некоторой степени обеспечивается возможностью формирования посадочного материала из корневых отпрысков [10].

Динамика годового поглощения CO₂ при реализации данного сценария представлена на рисунке 3. Величина поглощения С возрастает от 2 тыс. т С/год в первый год до максимальных 264 тыс. т С/год на 16-м году осуществле-

ния проекта, затем снижается до 101 тыс. т С/год к 30-му году. 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 фитомассы, который у разных вариантов лесных культур наблюдается в диапазоне возрастов от 5 до 21 года. Снижение поглощения углерода после 16-го года связано с тем, что к этому времени естественный максимум прироста фитомассы у большинства созданных за первые 12 лет насаждений уже минует.

Согласно проведённым расчётам, за 30 лет лесовосстановительной деятельности в соответствии с выбранным сценарием создаваемые лесные культуры накопят 4,63 млн т С или 16,98 млн т CO₂ (рис. 4). Найденные значения поглощения углерода достаточно высоки, чтобы служить дополнительным обоснованием экологических преимуществ проекта по восстановлению тугайных лесов в долине р. Или. Имеет смысл отметить, что вновь создаваемые лесные культуры при обеспечении адекватного ухода могут в течение длительного времени сохранять более высокие величины густоты в сравнении с насаждениями, использованными для оценки углерода фитомассы (рис. 1). В этом случае поглощение углерода будет более высоким при том же сценарии освоения площадей.

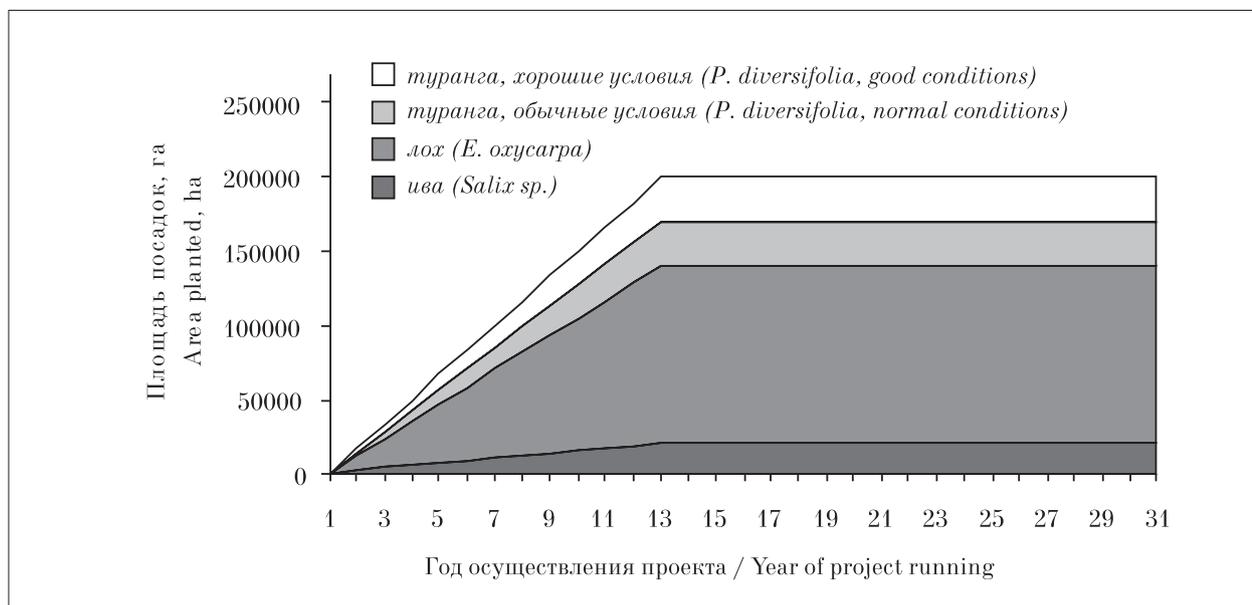


Рис. 2. Сценарий освоения площадей при планируемом лесовосстановлении в долине р. Или
 Fig. 2. Scenario of forest planting during planned reforestation in the Ili river valley

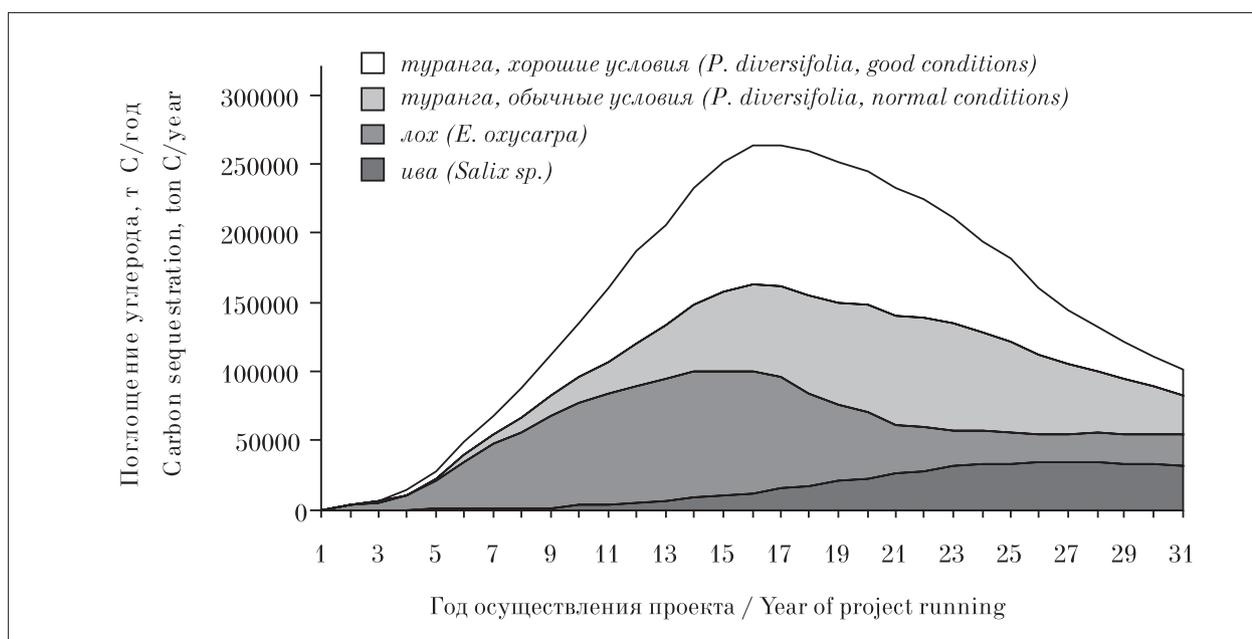


Рис. 3. Годичное поглощение углерода фитомассой древостоя при лесовосстановлении в долине р. Или
 Fig. 3. Annual carbon sequestration by the stand phytomass during reforestation in Ili river valley

Приведённые в данной работе оценки характеризуют лишь поглощение по пулу фитомассы древостоя планируемых к созданию лесных насаждений. При осуществлении лесовосстановительных проектов рекомендуется учитывать накопления С в пулах крупных древесных остатков (КДО), подстилки и почвы [7]. Для пула мёртвой древесины оценки могут быть получены расчётным образом на основе математической модели формирова-

ния пула КДО [11]. Для характеристики поглощения С пулами подстилки и почвы желательно проведение дополнительных полевых исследований [12]. В этом аспекте актуальны результаты мета-анализа изменения запаса С почвы при облесении в аридных районах [13]. Показано, что запас С почвы, как правило, увеличивается в зависимости от времени, прошедшего после посадки, повышаясь на 15% за 10 лет, на 50% за 10–30 лет, на

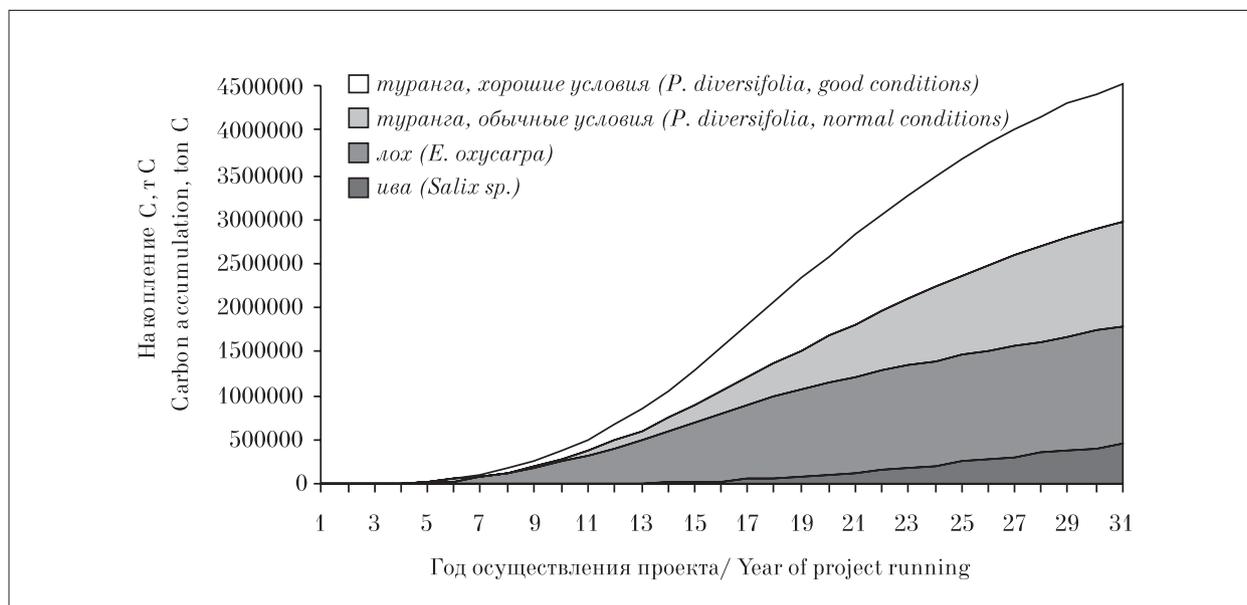


Рис. 4. Накопление углерода в фитомассе древостоя при лесовосстановлении в долине р. Или
 Fig. 4. Carbon accumulation by the stand phytomass during reforestation in Ili river valley

96% за время, большее 30 лет. Эти сведения дают основания полагать, что при облесении в районе исследования почвы могут обеспечить значимое поглощение С.

Среднее за 30 лет поглощение С на территории восстановленных лесных насаждений составляет 154 тыс. т С/год или 0,77 т С/(га • год). 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 поглощение С составляет от 0,84 до 3,52 т С/(га • год) [14]. Близкая к нашей оценке величина 0,84 т С/га найдена для проекта по облесению во Внутренней Монголии, наиболее сходной по климатическим условиям с регионом исследования. Остальные оценки получены для проектов в провинциях Сычуань и Гуанси, расположенных в субтропической зоне и обладающих более мягким климатом. Для проекта облесения, осуществляемого в Западной Австралии на площади 44000 га, среднее за 30 лет поглощение С оценивается в 0,20 т С/га [15], что намного меньше нашей оценки. Такое соотношение вполне объяснимо более суровыми по увлажнению (около 200 мм годовых осадков) условиями Западной Австралии. Проведённые сравнения позволяют заключить, что полученные в настоящей работе величины встраиваются в ряд известных из литературы оценок в соответствии с климатическими характеристиками исследуемой территории.

Заключение

Проблемы восстановления тугайных лесов ныне активно обсуждаются для ряда речных бассейнов Центральной Азии. Восстановленные тугайные леса обеспечивают разнообразные экосистемные сервисы, в частности, стабилизацию гидрологического цикла и возможность реинтродукции редких видов животных. Существенные экологические выгоды связаны с поглощением углерода создаваемыми лесными насаждениями. Прогнозная оценка поглощения углерода на период осуществления лесовосстановительного проекта возможна на основе сведений по ходу роста используемых древесных пород и сценариям освоения площадей, предназначенных для посадок леса. При облесении ныне безлесных 200 тыс. га в долине р. Или (Казахстан) средний уровень поглощения углерода фитомассой созданных насаждений составит 154 тыс. т С/год (565 тыс. т CO₂/год). За 30 лет созданные лесные культуры накопят 4,63 млн т С (16,98 млн т CO₂). Указанные объёмы поглощения С следует принимать во внимание при обосновании эколого-экономической значимости проектов по восстановлению тугайных лесов.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 19-77-30015 (оценка динамики запасов углерода в фитомассе) и WWF России (расчёт поглощения углерода по сценарию лесовосстановления).

Литература

References

1. Царук О.И., Чикин Ю.А. Туранский тигр – анализ современной ситуации. М.: WWF России, 2011. С. 1–37.
2. Александров А., Пандева Д. Лесные генетические ресурсы Европы, их сохранение и использование // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 1. С. 80–84.
3. Сипович В.В. Исследование хода роста туранговых насаждений // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1963. № 2. С. 27–29.
4. Муратчаева П.М.-С. Мониторинг состояния древесных пород в искусственных насаждениях Терско-Кумской низменности // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 1 (58). С. 39–44.
5. Горобец А.И. Продуктивность и санитарное состояние древостоев ивы ломкой в пойме реки Дон // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5. № 1 (17). С. 7–17.
6. Горобец А.И. Продуктивность и санитарное состояние древостоев ивы ломкой в поймах средних и малых рек Центрального Черноземья // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 49–54.
7. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. МГЭИК, 2003. [Электронный ресурс] https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html (Дата обращения: 02.07.2019).
8. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.
9. Khamzina A., Lamers J.P.A., Vlek P.L.G. Tree establishment under deficit irrigation on degraded agricultural land in the lower Amu Darya River region, Aral Sea Basin // Forest Ecology and Management. 2008. V. 255. P. 168–178.
10. Байтулин И.О., Байтулин А.И., Белгибаева Г.И. Сохранение и восстановление пойменных (тугайных) лесов реки Сырдарья // Рациональное использование и сохранение лесных ресурсов: Международная научная конференция. Выпуск 21. Бишкек: Илим, 2006. С. 47–51.
11. Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учётом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
12. Каганов В.В. Изменение экосистемных запасов углерода при облесении в степной и полупустынной зонах Европейской части России // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 7–12.
13. 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. V. 22. No. 2. P. 611–620.
14. Zhou W., Gong P., Gao L. A review of carbon forest development in China // Forests. 2017. V. 8. P. 295.
15. 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 // Journal of Arid Land Studies. 2012. V. 22. No. 1. P. 69–72.

1. Tsaruk O.I., Chikin Yu.A. Caspian tiger – analysis of recent situation. Moskva: WWF Rossii, 2011. P. 1–37 (in Russian).
2. Alexandrov A., Pandeva D. Forest genetic resources of Europe, their conservation and use // Theoretical and Applied Ecology. 2008. No. 1. P. 80–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-1-080-84
3. Sipovich V.V. Research of growth curves of turanga stands // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 1963. No. 2. P. 27–29 (in Russian).
4. Muratchaeva P.M.-S. Monitoring of the condition of tree species in artificial plantings of the Terek–Kuma lowland // Aridnye ekosistemy. 2014. V. 4. No. 1. P. 35–38. doi: 10.1134/S2079096114010053
5. Gorobets A.I. Productivity and sanitary state of stands of brittle willow in floodplain of the Don River // Lesotekhnicheskiiy zhurnal. 2015. V. 5. No. 1. P. 7–17 (in Russian).
6. Gorobets A.I. Productivity and sanitary state of stands of brittle willow in floodplain of medium and small rivers of Central Chernozemye // Lesotekhnicheskiiy zhurnal. 2016. V. 6. No. 4. P. 49–54 (in Russian).
7. Good Practice Guidance for Land Use, Land–Use Change and Forestry. IPCC, 2003. [Internet resource] https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html (Accessed: 02.07.2019).
8. Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V. Coefficients of conversion of growing stock volumes to phytomas for main forest forming species of Russia // Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo. 2003. No. 1. P. 119–127 (in Russian).
9. Khamzina A., Lamers J.P.A., Vlek P.L.G. Tree establishment under deficit irrigation on degraded agricultural land in the lower Amu Darya River region, Aral Sea Basin // Forest Ecology and Management. 2008. V. 255. P. 168–178.
10. Baitulin I.O., Baitulin A.I., Belgibaeva G.I. Conservation and restoration of floodplain (riparian) forests of Syr Darya river // Rational use and conservation of forest resources: Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. V. 21. Bishkek: Ilim, 2006. P. 47–51 (in Russian).
11. Zamolodchikov D.G. Assessment of carbon pool in coarse woody debris in Russian forests with accounting of influence of fires and felling // Lesovedenie. 2009. No. 4. P. 3–15 (in Russian).
12. Kaganov V.V. Change of ecosystem carbon reserves during afforestation in the steppe and semi-desert zones of the European part of Russia // Problemy regionalnoy ekologii. 2012. No. 4. P. 7–12 (in Russian).
13. 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 // Polish Journal of Environmental Studies. 2013. V. 22. No. 2. P. 611–620.
14. Zhou W., Gong P., Gao L. A review of carbon forest development in China // Forests. 2017. V. 8. P. 295. doi: 10.3390/f8080295
15. 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 // Journal of Arid Land Studies. 2012. V. 22. No. 1. P. 69–72.