

УДК 630*182.8+574.45

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ УГЛЕРОДА ФИТОМАССОЙ ДРЕВОСТОЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ТУГАЙНЫХ ЛЕСОВ¹

© 2020 г. Д. Г. Замолодчиков^{а, *}, В. В. Каганов^а, О. Н. Липка^б

^аЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117997 Россия

^бВсемирный фонд дикой природы (WWF России), ул. Николоямская, д. 19, стр. 3, Москва, 109240 Россия

*E-mail: dzamolod@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Разработана система прогнозной оценки поглощения углерода фитомассой древостоя при восстановлении тугайных лесов в долине р. Или (Республика Казахстан). Система состоит из уравнений связи между густотой и возрастом насаждения, средней высотой и возрастом, средним диаметром и густотой, а также включает аллометрические уравнения связи фитомассы древостоя и таксационных параметров. Система позволяет рассчитывать накопление и поглощение углерода фитомассой с временным шагом 1 г. Система применена к описанию хода роста туранги разнолистной трех вариантов бонитета, лоха остроплодного и ивы белой. В конце рассматриваемого 30-летнего периода осуществления лесовосстановительного проекта углерод фитомассы составит для туранги I класса бонитета 50.14 т С га⁻¹, II класса бонитета 40.51, III класса бонитета 35.79, лоха остроплодного 15.61, ивы белой 92.52 т С га⁻¹. Возраст максимального поглощения углерода заметно отличается в разных вариантах лесных насаждений и приходится на 9 лет у лоха остроплодного, 13 лет у туранги I класса бонитета, 16 лет у туранги II класса бонитета и ивы белой, 23 г. у туранги III класса бонитета. Система может быть применена к прогнозированию поглощения углерода фитомассой посадками иных лесобразующих пород при нахождении параметров уравнений регрессионным методом или на основе допущений о стартовых и предельных значениях густоты и средней высоты.

Ключевые слова: лесовосстановление, аридные регионы, тугайные леса, фитомасса древостоя, поглощение углерода, ход роста лесных насаждений, моделирование, прогнозирование.

DOI: 10.31857/S0024114820020114

В 2018 г. на территории Алматинской области Республики Казахстан был образован государственный природный резерват “Иле-Балхаш”. Главной целью создания особо охраняемой природной территории является реинтродукция туранского тигра, исчезнувшего на территории Казахстана в конце 1940-х гг. Для обеспечения хищников кормовой базой предполагается интродуцировать в резерват бухарского оленя, а также использовать весьма многочисленные к настоящему моменту популяции дикого кабана. Наряду с восстановлением фауны на территории резервата запланированы меры по усилению охраны сохранившихся и воссозданию утраченных тугайных лесов, которые должны стать экологическим каркасом особо охраняемой территории. Средообразующее воздействие воссозданных лесных насаждений обеспечит более благоприятные условия по темпера-

турным и влажностным характеристикам, чем существующие на ныне прилегающих к дельте р. Или пустынных ландшафтах. Предполагается, что при улучшении среды обитания повысится устойчивость и продуктивность экосистем резервата, что обеспечит условия для успешного восстановления популяции туранского тигра.

Широко известно, что лесные насаждения могут выступать в качестве инструмента долговременного закрепления атмосферного углерода. Древесная растительность в процессе своего роста активно поглощает углекислый газ атмосферы, переводя его в органическое вещество фитомассы и, впоследствии, при развитии лесных экосистем – в органическое вещество сухостоя, валежа и лесной подстилки. Внимание к величинам поглощения углерода при лесовосстановлении или облесении связано с проблемой современного глобального изменения климата, обусловленного увеличением содержания парниковых газов атмосферы при непрерывно растущих антропогенных эмиссиях этих газов (Изменение климата ..., 2013). Международные климатические соглаше-

¹ Работа выполнена при поддержке РНФ № 19-77-30015 (моделирование хода роста лесных культур и сопутствующего поглощения углерода) и WWF России (планирование лесовосстановительного проекта).

ния, от Рамочной конвенции ООН об изменении климата до Парижского соглашения, признают роль лесов как поглотителей парниковых газов и формируют различные финансовые и административные механизмы для усиления этой роли. В этой связи поглощение парниковых газов при восстановлении тугайных лесов в долине р. Или выступает дополнительным, но значимым фактором, облегчающим поиск средств для осуществления проекта. При этом одной из задач научного обеспечения проекта становится учет поглощения атмосферного углерода создаваемыми лесными насаждениями.

В научной литературе имеется достаточно примеров расчета накопления углерода (или органического вещества) в фитомассе лесных насаждений (Усольцев, 2002, 2016; Швиденко и др., 2006; Горобец и др., 2009; и др.). Биопродукционные таблицы, как правило, получают расчетным способом (Усольцев, 2003) на основе ранее созданных таблиц хода роста лесных насаждений, публикуемых в лесотаксационных справочниках или иных работах. В нашем случае проблема состоит в том, что для восстановления тугайных лесов будут применяться коренные древесные породы, а именно, туранга разнолистная (*Populus diversifolia* Schrenk), лох остроплодный (*Elaeagnus oxycarpa* Schltldl.) и ива белая (*Salix alba* L.). Несмотря на интенсивный поиск по отечественным и зарубежным публикациям, авторам настоящей статьи не удалось обнаружить таблиц биопродуктивности для туранги и лоха, в связи с чем возникла задача их построения на основе доступной информации с применением расчетных методов.

Вторая методическая проблема состоит в том, что как классические таблицы хода роста, так и современные таблицы биопродуктивности лесных насаждений чаще всего приводятся на интервалах таксационных классов возраста, то есть 10 или 20 лет. В частности, такова таблица биопродуктивности для ивы белой (Горобец и др., 2009). Обоснование углеродных проектов, как правило, проводится с интервалом в 1 год, при этом важное значение придается начальным стадиям формирования лесного насаждения (первые 10–20 лет), зачастую полностью упущенным в опубликованных таблицах хода роста или биопродуктивности. Авторы применили ряд методических приемов для интерполяции и экстраполяции имеющихся дискретных табличных данных по ходу роста лесных насаждений. Изложение разработанных расчетных приемов составляет вторую задачу настоящей статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исходными данными для расчетов поглощения углерода при лесовосстановлении послужили сведения из научных публикаций. Для насажде-

ний туранги имеется детальная работа (Сипович, 1963), выполненная в тугайных лесах пойм рек Аму-Дарьи, Сыр-Дарьи и Теджена. В этой работе приводится информация по ходу роста (средняя высота, средний диаметр, густота, видовое число, объемный запас) для насаждений туранги I, II и III классов бонитета. Наличие детальной работы (Сипович, 1963) значительно облегчило задачу авторов в отношении оценки углеродопогложительных свойств тугайных насаждений туранги.

Авторам не удалось найти работы, в которых характеризовались бы таксационные или биопродукционные свойства лоха остроплодного. В западной ботанической литературе распространено мнение, что таксон лох остроплодный *Elaeagnus oxycarpa* Schltldl. является синонимом лоха узколистного *Elaeagnus angustifolia* L. (Hasler, 2019), в то время как отечественные и азиатские ботаники склонны к признанию обоих таксонов (Цвелёв, 2002; Sum, Lin, 2010). Лох узколистный имеет широкое распространение, в Старом Свете активно используется в защитном лесоразведении и озеленении (Турчин и др., 2017; Залесов и др., 2014; и др.), в Северной Америке признается агрессивным инвазийным видом (Lesica, Miles, 1999; Espeland et al., 2017; и др.). Однако эти и другие работы не содержат информации о ходе роста насаждений лоха, что связано с отсутствием применения данного вида как источника древесины. Авторы использовали данные работы (Муратчаева, 2014), в которой рассматривается состояние ряда древесных пород, в том числе лоха узколистного, в искусственных насаждениях Терско-Кумской низменности. Имеются подробные сведения по росту лоха в высоту, а также отрывочные данные по густоте и диаметру. Далее по тексту настоящей статьи будет использоваться название “лох остроплодный”, поскольку при лесовосстановлении в долине р. Или будет применяться именно эта форма лоха.

Для ивы белой (она же ветла) доступны многочисленные работы, рассматривающие использование биомассы этой породы и ее гибридов в качестве энергетического сырья (Fisher et al., 2005; Kajba, Andrić, 2014; Weger et al., 2016; и др.). Сведения этих публикаций не вполне пригодны для решения задач настоящей работы в силу рассмотрения лишь ранних стадий развития древесных растений при крайне малом периоде ротации. Однако в некоторых публикациях имеется информация как по ходу роста ивы белой (Давидов, 1962; Швиденко и др., 2008), так и ее углеродным свойствам (Горобец и др., 2009; Shah et al., 2015). Основным источником информации для настоящей работы послужила таблица хода роста ветлы вегетативного происхождения класса бонитета Ib, построенная для условий Херсонского района Республики Украина (Давидов, 1962).

При нахождении параметров регрессионных уравнений использованы процедуры нелинейного оценивания пакета Statistica 10 (Statsoft, Inc).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нахождение количественных форм взаимосвязей таксационных характеристик лесных насаждений многие десятилетия является популярной формой активности в области лесоведения. Предложены разнообразные математические выражения, описывающие ход роста в высоту или по диаметру, изменения густоты, связи между коэффициентами формы и видовыми числами и так далее (Кузьмичев, 1977; Кофман, 1986; Куль, Куль, 1989; Швиденко и др., 2003, 2008; Рогозин, Разин, 2015 и др.). На основе проанализированной литературной информации и тестовых аппроксимаций по оцениваемым древесным породам авторами были выбраны три уравнения, характеризующие изменение густоты насаждения, ход роста в высоту и зависимость диаметра от высоты.

Для описания изменения густоты насаждения использовано уравнение (1), которое относится к уравнениям модифицированной экспоненты, часто используемых при прогнозировании экономических процессов (Льюис, 1986):

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

где $N(a)$ – густота в возрасте 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, представляет собой классическое логистическое уравнение, предложенное бельгийским математиком П.Ф. Ферхюльстом и ныне широко используемое в динамике популяций (Ризниченко, 2003):

$$H(a) = \frac{HE \times H0 \times e^{Ka}}{HE - H0 - H0 \times e^{Ka}}, \quad (2)$$

где $H(a)$ – средняя высота насаждения к возрасту a ; HE , $H0$ и K – параметры. Параметр HE соответствует максимальной средней высоте, к которой асимптотически приближается фактическая средняя высота по мере роста лесного насаждения. $H0$ – 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, которые в

момент посадки действительно имеют 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 связь между высотой и диаметром близка к прямо пропорциональной. Более высокие величины B означают, что с увеличением высоты диаметр возрастает относительно быстрее (дерево больше растет в ширину, чем в высоту).

Совокупность уравнений (1–3) позволяет аппроксимировать ход роста древостоя при наличии как детальных таблиц, так и отрывочных сведений для отдельных возрастов. В нашем случае присутствуют оба крайних и промежуточный вариант. Для различных вариантов насаждений туранги имеются детальные таблицы, причем представленные с шагом в 1 г. по времени. Для лоха узколистного имеются сведения по росту в высоту, всего лишь две точки с определениями диаметров и одна точка с определением густоты. Рост ивы белой охарактеризован 6 точками на интервале от 5 до 30 лет.

Согласно проектным планам по облесению долины р. Или, начальная густота создаваемых лесных культур будет составлять 2500 шт. га⁻¹. Исходя из этого соображения, параметрам $N0$ для большинства уравнений вида (1) были приписаны значения, равные 2500, а регрессионный поиск проводился лишь по двум параметрам – NE и K . Исключение представляла ива, у которой густота 2500 шт. га⁻¹ согласно исходным данным (Давидов, 1962) отмечена в возрасте 5 лет. Для ивы регрессионный поиск велся по 3 параметрам уравнения (1), а найденное значение $N0$ составило 3409 шт. га⁻¹.

Найденные параметры уравнений густоты рассматриваемых древесных пород представлены в табл. 1. Обратим внимание на высокие коэффициенты детерминации R^2 уравнений, составляющие для разных вариантов туранги от 0.977 до 0.987, ивы 0.999 при размерах выборки от 6 до 18. С одной стороны, высокие R^2 свидетельствуют об удачном выборе формы уравнения (1), с другой, необходимо учитывать, что публикуемые таблицы хода роста представляют собой обработанные данные, в которых уже были использованы процедуры сглаживания и интерполяции. Потому источники вариации, связанные с неравномерностями роста либо строения конкретных насаждений в таблицах хода роста отсутствуют. Данный комментарий касается и высоких R^2 уравнений

Таблица 1. Параметры уравнений для расчета избранных таксационных характеристик в насаждениях туранги, лоха и ивы. R^2 – коэффициент детерминации, n – размер выборки, расшифровка обозначений параметров представлена в тексте статьи

Порода	Параметры уравнений таксационных характеристик													
	уравнение (1) густоты от возраста					уравнение (2) высоты от возраста					уравнение (3) диаметра от высоты			
	N_0	NE	K	R^2	n	H_0	HE	K	R^2	n	A	B	R^2	n
Туранга разнолиственная, I класс бонитета	2500	806	-0.0862	0.977	18	0.995	15.98	0.271	0.995	19	1.132	1.070	0.994	19
Туранга разнолиственная, II класс бонитета	2500	1157	-0.0960	0.981	13	0.746	13.60	0.234	0.994	16	1.594	0.934	0.988	16
Туранга разнолиственная, III класс бонитета	2500	1268	-0.0910	0.987	8	0.662	13.87	0.167	0.993	16	1.594	0.934	0.988	16
Лох остроплодный	2500	1500	-0.0952	–	1	1.024	5.58	0.359	0.996	20	0.022	3.498	–	2
Ива белая	3409	45	-0.0624	0.999	6	2.198	21.57	0.169	0.996	6	0.836	1.142	0.990	6

для средней высоты и диаметра (табл. 1). Для лоха удалось найти лишь одно значение густоты, составившее 1900 для возраста 10 лет. Параметр K был найден подбором при допущении, что параметр NE (асимптотическое значение) равен 1500.

Рис. 1 представляет исходные и расчетные оценки густоты исследуемых насаждений. Очевидно тесное совпадение исходных и расчетных значений для всех вариантов насаждений туранги. Напомним, что начальное значение 2500 шт. га⁻¹ было выбрано в соответствии с проектными планами по лесовосстановлению в долине р. Или. Выбор такого стартового значения не препятствует успешной аппроксимации дальнейших изменений густоты, характерных для тугайных лесов региона (Сипович, 1963). Значения густоты логично различаются для разных вариантов насаждений туранги: чем больше размеры деревьев при сходном возрасте, тем меньше густота. Эту

закономерность продолжают насаждения ивы (высоты до 21 м) и лоха (высоты до 6 м).

Для хода роста в высоту складывается наилучшая ситуация по обеспеченности исходными данными, выборки по исследуемым породам составляют от 6 (ива) до 20 (лох остроплодный). Параметры всех уравнений были оценены с использованием регрессионного анализа, коэффициенты R^2 составили от 0.993 до 0.996 (табл. 1). Асимптоты средней высоты (HE) варьируют от 5.6 м у лоха до 21.6 м у ивы, в то время как параметр K от 0.167 (туранга III класса бонитета) до 0.359 (лох). Различия в параметре K определяют скорость достижения асимптотической высоты. У лоха рост в высоту происходит за первые 15 лет, далее средняя высота увеличивается незначительно. В то же время туранга III класса бонитета, у которой K имеет наименьшую величину (0.167), продолжает заметно увеличивать высоту и в конце рассматриваемого 30-летнего периода (рис. 2).

Стоит обратить внимание на оценки средней высоты растений в нулевой отсчет времени, который можно рассматривать как момент создания лесной культуры. Расчетные средние высоты варьируют от 0.66 (туранга III класса бонитета) до 2.2 м. На первый взгляд, растение возрастом 0 лет не может иметь высоту 1–2 м. С одной стороны, здесь сказывается традиционный подход к определению возраста деревьев на высоте груди, не учитывающий годичные кольца, заложенные на высоте менее 1.3 м. Таким образом, интервал 0–1 г. может условно рассматриваться как время превышения высотой значения 1.3 м. С другой стороны, закладку лесных культур в регионе исследования предполагается осуществлять саженцами высотой около 1 м (Байтулин и др., 2006), и тогда момент времени ноль следует считать временем посадки лесного насаждения.

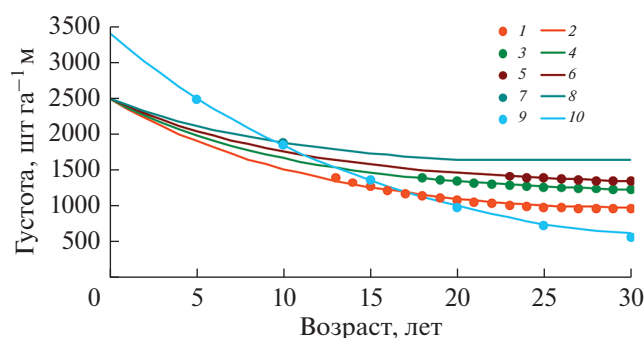


Рис. 1. Натурные (маркеры) (Давидов, 1962; Муратчаева, 2014; Сипович, 1963) и модельные (линии) оценки динамики густоты насаждений: 1, 2 – туранга I класса бонитета; 3, 4 – туранга II класса бонитета; 5, 6 – туранга III класса бонитета; 7, 8 – лох остроплодный; 9, 10 – ива белая.

Высокие коэффициенты детерминации (0.988–0.994) характерны и для связи между высотой и диаметром (табл. 1), что выражается в хорошем согласии исходных и модельных величин (рис. 3). Для лоха остроплодного имелось всего 2 точки с определениями среднего диаметра, что, тем не менее, позволило установить параметры уравнения по методу минимальных квадратов. Параметр B для туранги и ивы варьирует от 0.934 до 1.142, следовательно, связь между диаметром и высотой не столь уж сильно отличается от линейной (дерево растет в ширину примерно так же, как и в высоту). Для лоха этот параметр равен 3.498, т.е. диаметр возрастает значительно быстрее, чем высота. Это вполне соответствует известным данным по биологии лоха, согласно которым его насаждения имеют высоту до 6 м, но при этом могут достигать диаметра 30 см (Коропачинский, Встовская, 2002).

Отметим, что уравнение (3) характеризует диаметр на высоте груди (1.3 м). При этом по нему могут быть найдены значения и для высот, меньших 1.3 см. При строгом подходе для таких высот должны быть проставлены значения диаметров, равные 0. Однако протасовка нолей исключит возможность дальнейшего расчета фитомассы. В этой связи мы приводим численные значения диаметра для высот, меньших 1.3 м, с оговоркой, что это фиктивная величина, используемая в дальнейших расчетах фитомассы.

Нахождение параметров уравнений (1–3) для рассматриваемых древесных пород позволило рассчитать динамику ключевых таксационных показателей на интервале возраста 0–30 лет. Полученные данные могут быть использованы для оценки фитомассы (в кг абсолютно сухого вещества) на основе аллометрических уравнений. Построение аллометрических уравнений фитомассы для различных древесных пород является одним из популярных направлений лесной науки (Усольцев, 2002; Zianis et al., 2005; и др.). Для оценки фитомассы туранги использовано уравнение (4) из работы (Уткин и др., 1996):

$$Ph = 0.0968(D^2 H)^{0.807}, \quad (4)$$

где Ph – полная фитомасса (включая подземную), кг на дерево; D – диаметр, см; H – высота, м.

Для лоха остроплодного применены уравнения из работы (Zhou et al., 2007), приведенные отдельно по стволу и ветвям первого уровня:

$$Ph_t = 0.3019D^{1.733}, \quad (5)$$

где Ph_t – фитомасса ствола, кг на дерево; D – диаметр на высоте груди, см;

$$Ph_b = 0.05067 \left(\sum_i^3 Db_i^2 \right)^{1.162}, \quad (6)$$

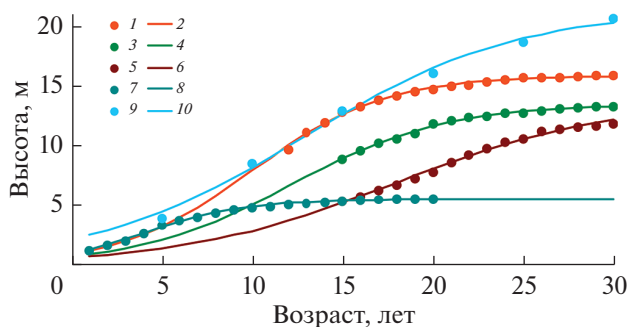


Рис. 2. Натурные (Давидов, 1962; Муратчаева, 2014; Сипович, 1963) и модельные оценки роста в высоту насаждений туранги, лоха остроплодного и ивы белой. Обозначения как на рис. 1.

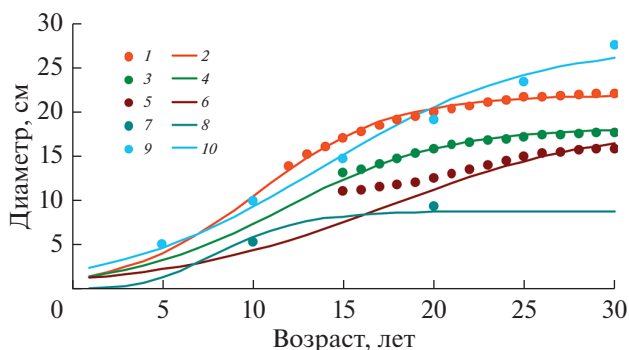


Рис. 3. Натурные (Давидов, 1962; Муратчаева, 2014; Сипович, 1963) и модельные оценки роста по диаметру насаждений туранги, лоха остроплодного и ивы белой. Обозначения как на рис. 1.

где Ph_b – фитомасса кроны, кг на дерево; Db – диаметр ветвей 1-го порядка в месте отхода от ствола, см. Расчет по уравнению (6) проводился при допущении, что $Db = 1/3D$. Уравнения (5) и (6) характеризуют надземную фитомассу растения лоха, для вычисления полной фитомассы по надземной был использован коэффициент 1.25.

Уравнение (7) для полной фитомассы ивы белой было построено нами по данным работы (Горобец и др., 2009):

$$Ph = 0.0730(D^2 H)^{0.870}, \quad (7)$$

где Ph – полная фитомасса, кг на дерево; D – диаметр, см; H – высота, м.

Уравнения (5–7) характеризуют фитомассу отдельного “среднего” дерева, для определения фитомассы насаждения найденные значения были умножены на густоту и пересчитаны в $t\ га^{-1}$, для нахождения запаса углерода фитомассы использован коэффициент 0.5. Динамика запаса углерода насаждений туранги различных классов бонитета представлена в табл. 2, лоха остроплодного и ивы белой в табл. 3. В конце рассматриваемого 30-летнего периода осуществления лесовосстановительного проекта углерод фитомассы составит для ту-

Таблица 2. Динамика средней высоты (H), среднего диаметра (D), густоты (N) и запаса углерода фитомассы (C_{ph}) в насаждениях туранги разнолистной при разных бонитетах

A , лет	I класс бонитета				II класс бонитета				III класс бонитета			
	H , м	D , см	N , шт. га ⁻¹	C_{ph} , т С га ⁻¹	H , м	D , см	N , шт. га ⁻¹	C_{ph} , т С га ⁻¹	H , м	D , см	N , шт. га ⁻¹	C_{ph} , т С га ⁻¹
0	1.0	0.8	2500	0.16	0.7	1.2	2500	0.09	0.7	1.1	2500	0.07
1	1.3	1.5	2360	0.23	0.9	1.5	2377	0.14	0.8	1.3	2393	0.09
2	1.6	1.9	2232	0.40	1.2	1.8	2265	0.22	0.9	1.5	2295	0.13
3	2.1	2.5	2114	0.69	1.4	2.2	2164	0.35	1.1	1.7	2206	0.18
4	2.6	3.2	2006	1.17	1.8	2.7	2072	0.55	1.2	1.9	2124	0.25
5	3.3	4.0	1907	1.92	2.1	3.2	1988	0.85	1.4	2.2	2050	0.34
6	4.0	5.0	1816	3.07	2.6	3.9	1912	1.29	1.7	2.6	1982	0.47
7	4.9	6.2	1732	4.74	3.1	4.6	1843	1.93	1.9	2.9	1920	0.64
8	5.9	7.5	1656	7.08	3.7	5.4	1780	2.82	2.2	3.4	1863	0.87
9	6.9	8.9	1586	10.14	4.4	6.3	1723	4.03	2.5	3.8	1811	1.17
10	8.0	10.4	1521	13.93	5.1	7.3	1671	5.61	2.9	4.3	1764	1.57
11	9.0	12.0	1462	18.32	5.9	8.3	1624	7.59	3.3	4.9	1721	2.08
12	10.1	13.4	1408	23.09	6.7	9.4	1581	9.96	3.8	5.5	1682	2.72
13	11.0	14.8	1358	27.95	7.5	10.4	1542	12.68	4.2	6.1	1646	3.53
14	11.9	16.1	1313	32.61	8.2	11.4	1507	15.66	4.7	6.8	1613	4.53
15	12.7	17.2	1271	36.82	9.0	12.4	1475	18.79	5.3	7.5	1583	5.72
16	13.3	18.1	1232	40.43	9.7	13.3	1446	21.92	5.8	8.3	1556	7.12
17	13.9	18.9	1197	43.37	10.3	14.1	1419	24.95	6.4	9.0	1531	8.74
18	14.3	19.6	1165	45.64	10.8	14.8	1395	27.75	7.0	9.8	1508	10.57
19	14.7	20.1	1135	47.30	11.3	15.4	1373	30.28	7.6	10.5	1487	12.58
20	15.0	20.5	1108	48.43	11.7	15.9	1354	32.47	8.1	11.3	1468	14.75
21	15.2	20.8	1083	49.14	12.1	16.3	1336	34.33	8.7	12.0	1451	17.04
22	15.4	21.1	1060	49.50	12.4	16.7	1319	35.87	9.2	12.7	1435	19.39
23	15.5	21.3	1039	49.61	12.6	17.0	1304	37.12	9.7	13.3	1420	21.77
24	15.6	21.5	1024	49.72	12.8	17.3	1291	38.10	10.2	13.9	1407	24.12
25	15.7	21.6	1012	49.80	13.0	17.5	1279	38.86	10.6	14.5	1395	26.40
26	15.8	21.7	1004	49.90	13.1	17.6	1267	39.44	11.0	15.0	1384	28.58
27	15.8	21.8	998	49.99	13.2	17.7	1257	39.87	11.4	15.4	1374	30.62
28	15.9	21.8	993	50.05	13.3	17.9	1248	40.17	11.7	15.9	1365	32.51
29	15.9	21.8	990	50.10	13.3	17.9	1240	40.38	12.0	16.2	1356	34.23
30	15.9	21.9	987	50.14	13.4	18.0	1232	40.51	12.2	16.5	1349	35.79

ранги I класса бонитета 50.14, II класса – 40.51, III класса – 35.79, лоха остроплодного 15.61, ивы белой 92.52 т С га⁻¹. Различия в запасах углерода логично объясняются характером роста каждого варианта лесного насаждения.

Популярным альтернативным методом расчетного определения запасов углерода в лесах является конверсия из запаса древесины (м³ га⁻¹) с использованием конверсионных коэффициентов. В частности, этот метод рекомендуется Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) для формирования национальных кадастров парниковых газов (Руководящие указания ..., 2003). Наличие данных по объемным запасам древесины в работе (Сипович, 1963) дает возможность рассчитать запасы углерода фитомассы конверсион-

ным методом с применением коэффициентов из работы (Замолотчиков и др., 2003), составляющими 0.356 ± 0.55 для интервала возраста 1–20 лет и 0.363 ± 0.45 для возраста свыше 20 лет. Совпадение оценок в целом можно признать удовлетворительным, как правило, расхождение находится в пределах интервала неопределенности конверсионной оценки (рис. 4). Конверсия несколько завышает запас углерода при значениях ниже 30 т С га⁻¹ и занижает при величинах выше 40 т С га⁻¹. Среднее значение по аллометрическим оценкам равно 43.54 т С га⁻¹, по конверсионным 38.3 ± 5.10 т С га⁻¹, т.е. расхождение укладывается в пределы неопределенности.

Динамика поглощения углерода, рассчитанного по разности запасов углерода фитомассы в соседних возрастах, представлена на рис. 5. Для

Таблица 3. Динамика избранных таксационных характеристик и запаса углерода фитомассы в насаждениях лоха остроплодного и ивы белой

A, лет	Лох остроплодный				Ива белая			
	H, м	D, см	N, шт га ⁻¹	Cph, т С га ⁻¹	H, м	D, см	N, шт га ⁻¹	Cph, т С га ⁻¹
0	1.0	0.0	2500	0.00	2.2	2.1	3409	0.86
1	1.4	0.1	2409	0.00	2.6	2.4	3205	1.25
2	1.8	0.2	2327	0.02	3.0	2.9	3014	1.79
3	2.2	0.4	2252	0.07	3.4	3.4	2835	2.54
4	2.7	0.7	2183	0.23	3.9	4.0	2666	3.57
5	3.2	1.3	2121	0.64	4.5	4.7	2507	4.95
6	3.7	2.1	2065	1.46	5.1	5.4	2358	6.77
7	4.1	3.0	2014	2.79	5.8	6.3	2219	9.13
8	4.5	4.0	1967	4.58	6.6	7.2	2087	12.11
9	4.7	5.0	1925	6.64	7.4	8.2	1964	15.80
10	5.0	5.9	1886	8.70	8.2	9.3	1848	20.24
11	5.1	6.6	1851	10.55	9.1	10.4	1739	25.43
12	5.3	7.2	1819	12.08	10.0	11.6	1636	31.33
13	5.4	7.6	1790	13.26	10.9	12.8	1540	37.83
14	5.4	8.0	1764	14.11	11.8	14.0	1449	44.76
15	5.5	8.2	1740	14.70	12.7	15.2	1365	51.91
16	5.5	8.4	1718	15.09	13.6	16.4	1285	59.03
17	5.5	8.5	1698	15.32	14.4	17.6	1210	65.87
18	5.5	8.6	1680	15.45	15.2	18.7	1139	72.19
19	5.6	8.7	1664	15.50	15.9	19.7	1073	77.80
20	5.6	8.7	1654	15.55	16.6	20.6	1011	82.55
21	5.6	8.8	1648	15.60	17.2	21.5	952	86.33
22	5.6	8.8	1645	15.64	17.8	22.3	898	89.13
23	5.6	8.8	1643	15.67	18.3	23.0	846	90.95
24	5.6	8.8	1642	15.69	18.7	23.7	798	91.85
25	5.6	8.8	1641	15.70	19.1	24.3	754	92.16
26	5.6	8.8	1640	15.72	19.4	24.8	717	92.27
27	5.6	8.8	1640	15.72	19.8	25.2	687	92.36
28	5.6	8.8	1640	15.73	20.0	25.6	662	92.44
29	5.6	8.8	1639	15.73	20.2	25.9	642	92.52
30	5.6	8.8	1639	15.74	20.4	26.2	625	92.52

всех типов лесных насаждений характерен уни-модальный тип динамики поглощения. Возраст максимального поглощения углерода заметно отличается в разных вариантах и приходится на 9 лет у лоха остроплодного, 13 лет у туранги I класса бонитета, 16 лет у туранги II класса бонитета и ивы белой, 23 г. у туранги III класса бонитета. Наличие пиков поглощения, приходящихся на разные временные интервалы, следует рассматривать как положительный факт, способствующий увеличению равномерности поглощения за время осуществления и мониторинга лесовосстановительного проекта (30 лет).

Представленные в настоящей работе оценки характеризуют поглощение углерода лишь одним пулом лесных насаждений, а именно, фитомассой древостоя. Значительные количества углерода могут поглощаться и другими пулами лесной экосистемы, в частности, мертвой древесиной,

подстилкой и органическим веществом почвы. Существуют разнообразные расчетные методы, позволяющие осуществить прогнозную оценку поглощения этими пулами. В частности, динамика углерода крупных древесных остатков может быть найдена по модели (Замолодчиков, 2011), которая использует в качестве входных данных величины отпада и его размерные характеристики, а также климатические параметры. Оценка поглощения углерода пулами мертвого органического вещества не входила в цели настоящей работы. Авторы надеются, что осуществление лесовосстановительного проекта в долине р. Или обеспечит возможность проведения натурного мониторинга изменений запасов углерода во всех пулах, и тем самым формирование нового знания по круговоротам углерода в аридных районах.

Первая цель настоящей работы состояла в нахождении потенциальных величин поглощения

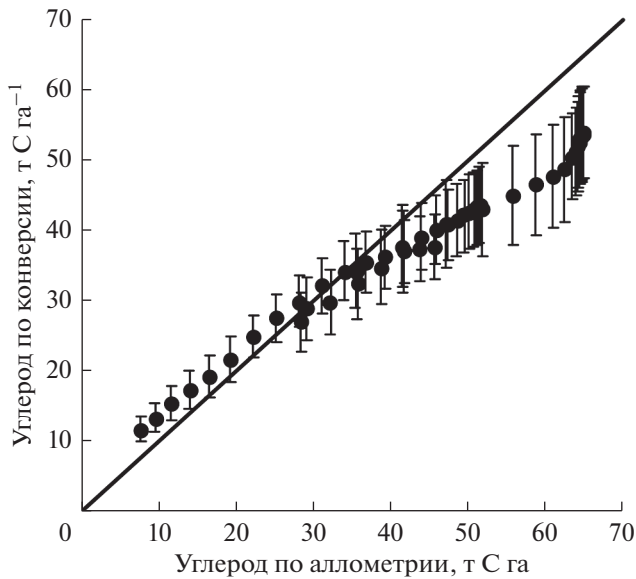


Рис. 4. Сравнение оценок углерода фитомассы насаждений туранги, полученных аллометрическим и конверсионным методом.

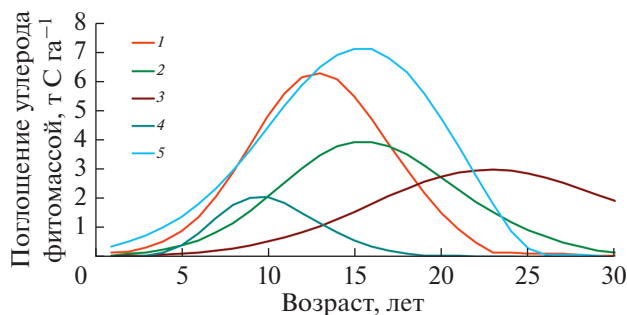


Рис. 5. Поглощение углерода фитомассой при росте лесных насаждений: 1 – туранга I класса бонитета; 2 – туранга II класса бонитета; 3 – туранга III класса бонитета; 4 – лох остроплодный; 5 – ива белая.

углерода лесными насаждениями, которые планируется использовать при осуществлении масштабного лесовосстановительного проекта в долине р. Или. Необходимые сведения либо отсутствовали в научной литературе (для туранги разнолистной и лоха остроплодного), либо не предоставляли характеристики на детальном временном шаге (ива белая). Следует подчеркнуть, что фактическое поглощение углерода при осуществлении лесовосстановительного проекта будет соответствовать полученным оценкам только в том случае, если реальная динамика таксационных характеристик окажется близкой к прогнозной. По-видимому, наибольшие риски расхождений связаны с динамикой густоты. В нашем исследовании стартовые величины густоты (2500 шт. га^{-1} для туранги и лоха) установлены согласно проектным

планам, а конечные взяты из научных источников информации по росту лесных насаждений (Давидов, 1962; Сипович, 1963; Муратчаева, 2014). Согласно проведенным расчетам, приживаемость культур к 30-му году будет составлять у туранги от 39 до 53%, у лоха 65%, у ивы 18%. В то же время осуществляемые проекты по аридному лесоразведению часто сталкиваются с проблемой малой приживаемости лесных культур. В частности, в Китае, проводящем масштабные программы по лесоразведению, средний уровень приживаемости лесных посадок в аридных и полуаридных регионах составил всего 15% (Сао, 2008).

При устройстве садовых плантаций плодовых деревьев с высокой плотностью показатели приживаемости близки к 100% даже в аридных условиях (Díez et al., 2016; и др.). Причина состоит в том, что каждому дереву уделяется много внимания и обеспечивается хороший уход. В задачи проекта по восстановлению лесов входит максимально приблизить режим ухода за саженцами к садовым плантациям, что позволит сократить процент погибших деревьев. С 2019 г. проводятся опытные посадки лоха и ивы, чтобы оценить, насколько может быть повышена приживаемость. Однако площадь посадок в рамках проекта настолько велика, что перейти на садоводческие технологии полностью не представляется возможным. Более точная информация о возможном качестве ухода для каждого из выделов лесных посадок будет определена на этапе согласования договоров с арендаторами земельных участков, в которых будет оговорено качество ухода за посадками.

Вторая цель работы состояла в представлении методического подхода, обеспечивающего формирование детальной информации, достаточной для обоснования углеродной компоненты лесовосстановительных проектов. Нами предложена совокупность простых уравнений (1–3), параметры которых могут быть идентифицированы методами регрессионного анализа либо принятием допущений о начальных и предельных значениях густоты и средней высоты насаждения. Авторы признают, что лесной наукой разработаны существенно более детальные и мощные способы математического описания хода роста лесных насаждений, но при этом полагают, что предложенная система представляет разумный баланс между сложностью построения и точностью описания. Это может обеспечить предложенной совокупности уравнений потенциал активного прикладного использования.

Заключение. Восстановление лесов в аридных местообитаниях обеспечивает формирование значительного числа экологических выгод, в том числе улучшение регионального климата, поддержание водного стока, реставрацию биоразнообразия и поглощение углерода. В статье предложена

система простых уравнений, обеспечивающая расчет поглотительной способности создаваемых лесных насаждений. Система применена к прогнозу поглощения углерода насаждениями туранги разнолистной, лоха остроплодного и ивы белой. Эти древесные породы будут использоваться при осуществлении лесовосстановительного проекта в долине р. Или. Авторы полагают, что предложенная система представляет разумный баланс между сложностью построения и точностью описания, что обеспечит ей потенциал активного прикладного использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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, 3–7 октября 2006 г., г. Бишкек. Выпуск 21. Бишкек: Илим, 2006. С. 47–51.
- Горобец А.И., Таранков В.И., Сизых В.Н.* Сравнительная оценка углероддепонирующей и кислородопroduцирующей функций дубравы и ветляника // Лесной вестник. 2009. № 3. С. 43–48.
- Давидов М.В.* Рост и продуктивность насаждений ветлы (*Salix alba* L.) // Известия высших учебных заведений. Лесной журн. 1962. № 5. С. 9–14.
- Залесов С.В., Азбаев Б.О., Данчева А.В., Рахимжанов А.Н., Ражанов М.Р., Суюндиков Ж.О.* Искусственное лесоразведение вокруг г. Астаны // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13438>. Дата обращения 08.07.2019.
- 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., Уткин А.И., Честных О.В.* Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1(32). С. 119–127.
- Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для политиков / Под ред. Т. Ф. Стокера и др. Кембридж: Кембридж Университи Пресс, 2013. 28 с.
- Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н.* Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 707 с.
- Кофман Г.Б.* Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 211 с.
- Кузьмичев В.В.* Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977. 160 с.
- Куль К., Куль О.* Динамическое моделирование роста деревьев. Таллинн: Валгус, 1989. 231 с.
- Льюис К.С.* Методы прогнозирования экономических показателей. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986. 133 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.
- Ризниченко Г.Ю.* Математические модели в биофизике и экологии. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 184 с.
- Рогозин М.В., Разин Г.С.* Модели динамики и моделирование развития древостоев // Сибирский лесной журн. 2015. № 2. С. 55–70. <https://doi.org/10.15372/SJFS20150205>
- Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. МГЭИК, 2003. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html. Дата обращения: 02.07.2019.
- Сивович В.В.* Исследование хода роста туранговых насаждений // Известия высших учебных заведений. Лесной журн. 1963. № 2. С. 27–29.
- Турчин Т.Я., Ермолова А.С., Пичуева Г.В.* Приживаемость и рост аборигенных и интродуцированных видов древесных растений на среднебугристых песках в степной зоне // Лесохозяйственная информация. 2017. № 3. С. 20–34. URL: <http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru/soderjanie-2017-3>. Дата обращения 08.07.2019.
- 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.
- Усольцев В.А.* Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с.
- Усольцев В.А.* Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 407 с.
- Усольцев В.А.* Биологическая продуктивность лесобразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: Уральский гос. лесотех. университет, 2016. 384 с.
- Цвелёв Н.Н.* О родах *Elaeagnus* и *Hippophae* (Elaeagnaceae) в России и сопредельных странах // Ботанический журн. 2002. Т. 87. № 11. С. 74–86.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И.* Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России // Лесное хозяйство. 2003. № 6. С. 34–38.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И.* Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, Международный институт прикладного системного анализа, 2006. 886 с.
- Cao S.* Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem // Environmental Science and Technology. 2008. V. 42. № 6. P. 1826–1831.
- Diez C.M., Moral J., Cabello D., Morello P., Rallo L., Barranco D.* Cultivar and tree density as key factors in the long-term performance of super high-density olive orchards // Frontiers in Plant Science. 2016. V. 7. Art. № 1226. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01226>
- Espeland E.K., Muscha J.M., Scianna J., Kilian R., West N.M., Petersen M.K.* Secondary invasion and reinvasion after Russian-olive removal and revegetation // Invasive Plant Science

and Management. 2017. V. 10. № 4. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1017/inp.2017.36>

Fischer G., Prieler S., van Velthuisen H. T. Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia // Biomass and Bioenergy. 2005. V. 28. № 2. P. 119–132.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.013>

Hassler M. World plants: synonymic checklists of the vascular plants of the world // Catalogue of Life: Annual Checklist. 2019. URL: www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2019. Дата обращения 08.07.2019.

Kajba D., Andrić I. Selection of willows (*Salix* sp.) for biomass production // South-East European Forestry. 2014. V. 5. № 2. P. 145–151.
<https://doi.org/10.15177/see-for.14-14>

Lesica P., Miles S. Russian olive invasion into cottonwood forests along a regulated river in north-central Montana // Canadian J. Botany. 1999. V. 77. № 8. P. 1077–1083.

Shah M., Masoodi T.H., Khan P.A., Wani J.A., Mir S.A. Vegetation analysis and carbon sequestration potential of *Salix*

alba plantations under temperate conditions of Kashmir, India // Indian Forester. 2015. V. 141. № 7. P. 755–761.

Sum M., Lin Q. A revision of *Elaeagnus* L. (Elaeagnaceae) in mainland China // Journal of Systematics and Evolution. 2010. V. 48. № 5. P. 356–390.
<https://doi.org/10.1111/j.1759-6831.2010.00085.x>

Weger J., Hutla P., Bubník J. Yield and fuel characteristics of willows tested for biomass production on agricultural soil // Research in Agricultural Engineering. 2016. V. 62. № 4. P. 155–161.

<https://doi.org/10.17221/12/2014-RAE>

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 // Ecological Modelling. 2007. V. 202. Issue 3–4. P. 311–323.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.10.024>

Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Silva Fennica Monographs 4. Tampere: Tammer-Paino Oy, 2005. 63 p.

The Potential Absorption of Carbon by Trees' Biomass during the Restoration of Riparian Forests

D. G. Zamolodchikov^{1,*}, V. V. Kaganov¹, and O. N. Lipka²

¹Center of Forest Ecology and Productivity, RAS, Profsoyuznaya st., 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

²World Wildlife Fund (WWF Russia), Nikoloyamskaya st., 19, bldg. 3, Moscow, 109240 Russia

*E-mail: dzamolod@mail.ru

A predictive system was developed for the assessment of carbon absorption by trees phytomass during the restoration of riparian forests in a valley of Ili river (Kazakhstan republic)/ The system comprises the constraint equations between the density of forest stand and their age; mean height and age; mean trees' diameter and density; it includes the allometric constraint equations between trees phytomass and valuation parameters as well. The system allows to calculate the absorption and sequestration of carbon by the phytomass annually. The system was applied for the description of growth dynamics of desert poplar in three growth class variations, as well as the oleaster (*Elaeagnus oxycarpa*) and white willow. At the end of 30-years reforestation period the phytomass' carbon will constitute: up to 50.14 t C ha⁻¹ for the first-class desert poplar, 40.51 for the second-class, 35.79 for the third-class desert poplar, 15.61 for the oleaster 92.52 t C ha⁻¹ for the white willow. The maximum absorption capacity age was different for various forest stands: 9 years for oleaster, 13 for first-class desert poplar, 16 years for second-class desert poplar and the white willow, 23 years for the third-class desert poplar. The system can be applied to predicting the carbon absorption by other species' stands after finding the necessary parameters using the regression method or based on the assumption on start and maximum values of density and the mean height.

Keywords: reforestation, arid areas, riparian forests, trees phytomass, carbon absorption, forest stands growth, modeling, prediction.

Acknowledgement: The work was carried out with the support from the RSF № 19-77-30015 (forest cultures growth modeling and carbon absorption) and WWF Russia (forest restorative project planning).

REFERENCES

Baitulin I.O., Baitulin A.I., Belgibaeva G.I., Cokhranenie i vosstanovlenie poimennykh (tugainykh) lesov reki Cyrdar'ya (Conservation and restoration of floodplain (tugai) forests of the Syrdarya River), *Ratsional'noe ispol'zovanie i sokhranenie lesnykh resursov* (Rational Use and Conservation of Forest Resources), Proc. Conf., Bishkek, October 3–7, 2006, Bishkek: Ilim, 2006, Issue 21, pp. 47–51.

Cao S., Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem, *Environmental Science and Technology*, 2008, Vol. 42, No. 6, pp. 1826–1831.

Diez C.M., Moral J., Cabello D., Morello P., Rallo L., Baranco D., Cultivar and Tree Density As Key Factors in the Long-Term Performance of Super High-Density Olive Orchards, *Frontiers in Plant Science*, 2016, Vol. 7, Art. No. 1226, doi 10.3389/fpls.2016.01226

- Espeland E.K., Muscha J.M., Scianna J., Kilian R., West N.M., Petersen M.K., Secondary invasion and reinvasion after Russian-olive removal and revegetation, *Invasive Plant Science and Management*, 2017, Vol. 10, No. 4, pp. 1–10, doi 10.1017/inp.2017.36
- Fischer G., Prieler S., Van Velthuisen H.T., Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia *Biomass and Bioenergy*, 2005, Vol. 28, No. 2, pp. 119–132, doi:10.1016/j.biombioe.2004.08.013
- Gorobets A.I., Tarankov V.I., Sizykh V.N., Sravnitel'naya otsenka uglerododeponiruyushchei i kislorodoproductsiruyushchei funktsii dubravyy i vetlyanika (Comparative estimation of deposition of carbon and allocation of oxygen in the oak grove and the forest stand of the willow), *Lesnoi vestnik*, 2009, No. 3, pp. 43–48.
- Gorobets A.I., Tarankov V.I., Sizykh V.N., Sravnitel'naya otsenka uglerododeponiruyushchei i kislorodoproductsiruyushchei funktsii dubravyy i vetlyanika (Comparative estimation of deposition of carbon and allocation of oxygen in the oak grove and the forest stand of the willow), *Lesnoi vestnik*, 2009, No. 3, pp. 43–48.
- IPCC, 2013: Summary for policymakers, In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge – N.Y.: Cambridge University Press, 2013, 29 p.
- Kajba D., Andrić I., Selection of willows (*Salix* sp.) for biomass production, *South-East European Forestry*, 2014, Vol. 5, No. 2, pp. 145–151, <http://dx.doi.org/10.15177/see-for.14-14>
- Kofman G.B., *Rost i forma derev'ev* (Growth and form of trees), Novosibirsk: Nauka, 1986, 210 p.
- Koropachinskii I.Y., Vstovskaya T.N., *Drevesnye rasteniya Aziatskoi Rossii* (Woody plants of Asian Russia), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002, 707 p.
- Kul' K., Kul' O., *Dinamicheskoe modelirovanie rosta derev'ev* (Dynamic simulation of the tree growth), Tallin: Valgus, 1989, 231 p.
- Kuz'michev V.V., *Zakonomernosti rosta drevostoev* (Features of stand growth), Novosibirsk: Nauka, 1977, 160 p.
- Lesica P., Miles S., Russian olive invasion into cottonwood forests along a regulated river in north-central Montana, *Canadian J. Botany*, 1999, Vol. 77, No. 8, pp. 1077–1083.
- L'yuis K.S., *Metody prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazatelei* (Industrial and business forecasting methods), M.: Finansy i statistika, 1986, 133 p.
- Muratchaeva P.M.-S., Monitoring sostoyaniya drevesnykh porod v iskusstvennykh nasazhdeniyakh Tersko-Kumskoi nizmennosti (Monitoring of growth and condition of tree species in artificial plantings of Terek-Kuma lowland), *Aridnye ekosistemy*, 2014, Vol. 20., No. 1(58), pp. 39–44.
- Riznichenko G.Y., *Matematicheskie modeli v biofizike i ekologii* (Mathematical models in biophysics and ecology), Mo., Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2003, 183 p.
- Rogozin M.V., Razin G.S., Modeli dinamiki i modelirovanie razvitiya drevostoev (Dynamics models and modeling of tree stand development), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2015, No. 2, pp. 50–70.
- Rukovodyashchie ukazaniya po effektivnoi praktike dlya zemlepol'zovaniya, izmenenii v zemlepol'zovanii i lesnogo khozyaistva* (Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry), MGEIK, 2003, available at: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplucf/gpplucf_languages.html (July 02, 2019).
- Shah M., Masoodi T.H., Khan P.A., Wani J.A., Mir S.A., Vegetation analysis and carbon sequestration potential of *Salix alba* plantations under temperate conditions of Kashmir, India, *Indian Forester*, 2015, Vol. 141, No. 7, pp. 755–761.
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Bului Yu.I., Sistema modelei rosta i dinamiki produktivnosti lesov Rossii (The system of growth models and dynamics of forest productivity in Russia), *Lesnoe khozyaistvo*, 2003, No. 6, pp. 34–38.
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Bului Yu.I., *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* (Tables and models of the growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (normative reference materials)), M.: Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaistva, Mezhdunar. institut prikladnogo sistemnogo analiza, 2006, 886 p.
- Sipovich V.V., Issledovanie khoda rosta turangovykh nasazhdenii (Research of the Asiatic poplar stand development), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Lesnoi zhurnal*, 1963, No. 2, pp. 27–29.
- Sum M., Lin Q., A revision of *Elaeagnus* L. (Elaeagnaceae) in mainland China, *J. Systematics and Evolution*, 2010, Vol. 48, No. 5, pp. 356–390, doi 10.1111/j.1759-6831.2010.00085.x
- Tsvelev H.H., O rodakh *Elaeagnus* i *Hippophae* (Elaeagnaceae) v Rossii i sopredel'nykh stranakh (On the genera *Elaeagnus* and *Hippophae* (Elaeagnaceae) in Russia and adjacent states), *Botanicheskii zhurnal*, 2002, Vol. 87, No. 11, pp. 74–86.
- Turchin T.Y., Ermolova A.S., Pichueva G.V. Prizhivayemost' i rost aborigennykh i introdutsirovannykh vidov drevesnykh rastenii na srednebugristykh peskakh v stepnoi zone (Survival and Growth of Aboriginal and Introduced Woody Plant Species at Middle Hill Sandy Sites in Steppe Zone), *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2017, No. 3, pp. 20–34, available at: <http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru/soderjanie-2017-3> (July 08, 2019).
- Usol'tsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod v klimaticheskikh gradientakh Evrazii (k menezhzhmentu biosfernykh funktsii lesov)* (Biological productivity of forest-forming species in Eurasia's climatic gradients (as related to supporting decision-making processes in forest management)), Yekaterinburg: Izd-vo UGLTU, 2016, 383 p.
- Usol'tsev V.A., *Fitomassa lesov Severnoi Evrazii. Normativy i elementy geografii* (Forest biomass of Northern Eurasia. Norms and elements of geography), Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2002, 762 p.
- Usol'tsev V.A., *Fitomassa lesov Severnoi Evrazii: predel'naya produktivnost' i geografiya* (Forest biomass of northern Eurasia: the limits of productivity and their geography), Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2003, 406 p.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I., Allometricheskie uravneniya dlya fitomassy po dannym derev'ev sosny, eli, berezy i osiny v evropeiskoi chasti Rossii (Allometric equations for phytomass based on the data on pine, spruce, birch and aspen trees in european Russia), 1996, No. 6, pp. 36–46.

- Weger J. H.P., Bubenik J., Yield and fuel characteristics of willows tested for biomass production on agricultural soil, *Research in Agricultural Engineering*, 2016, Vol. 62, No. 4, pp. 155–161, doi 10.17221/12/2014-RAE
www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2019 (July 8, 2019).
- Zalesov S.V., Azbaev B.O., Dancheva A.V., Rakhimzhanov A.N., Razhanov M.R., Suyundikov Zh.O., available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13438> (July 08, 2019).
- Zamolodchikov D.G., Otsenka pula ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v lesakh Rossii s uchetom vliyaniya pozharov i rubok (An estimate of the carbon pool of coarse woody debris in forests of Russia with fire and cuts impact included), *Lesovedenie*, 2009, No. 4, pp. 3–15.
- Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V., Koefitsienty konversii zapasov nasazhdenii v fitomassu osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii (Conversion of stand volumes to phytomass: the factors for the dominant forest forming species of Russia), *Lesnaya taksatsiya i le-soustroistvo*, 2003, No. 1, pp. 119–127.
- 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, *Ecological Modelling*, 2007, Vol. 202, No. 3–4, pp. 311–323, doi 10.1016/j.ecolmodel.2006.10.024
- Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M., *Biomass and stem volume equations for tree species in Europe*, Silva Fennica Monographs 4, Tampere: Tammer-Paino Oy, 2005, 63 p.