

Г.Г. Суворова, Е.В. Попова

**ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ
ПРОДУКТИВНОСТЬ
ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ
ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

Г.Г. Суворова, Е.В. Попова
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
СИБИРСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИОЛОГИИ И БИОХИМИИ РАСТЕНИЙ

Г.Г. Суворова, Е.В. Попова

**ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ
ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

Ответственный редактор
член-корреспондент РАН *Р.К. Саляев*



НОВОСИБИРСК
АКАДЕМИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ГЕО"
2015

УДК 630*161.32:582.47(571.53)
ББК 28.57
С891

Суворова, Г.Г. Фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев Иркутской области [Электронный ресурс] / Г.Г. Суворова, Е.В. Попова ; отв. ред. Р.К. Салаяев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Сиб. ин-т физиол. и биохим. растений. – Новосибирск : Академическое изд-во “Гео”, 2015. – 95 с. Режим доступа: www.sifibr.irk.ru. – ISBN 978-5-906284-87-7.

В монографии представлены результаты эколого-физиологических исследований фотосинтетического поглощения атмосферного углерода хвойными древостоями, произрастающими на территории Иркутского региона. Показано, что хвойные (сосновые, лиственничные и еловые) древостои отличаются высоким уровнем фотосинтетического поглощения CO_2 . Количественно охарактеризована динамика фотосинтетического потока углерода в зависимости от условий вегетации. Определена средняя за ряд лет удельная величина показателя стока углерода. Оценена общая по области годовая продукция фотосинтетического кислорода хвойных древостоев. Разработан коэффициент газопоглотительной активности хвойных лесов, позволяющий оценивать соотношение техногенных выбросов CO_2 и ассимиляционных возможностей хвойных древостоев.

Книга предназначена для физиологов растений, экологов, специалистов, занимающихся экологической паспортизацией предприятий, исследователей газового состава атмосферы, а также для студентов и аспирантов.

Рецензенты:

д-р биол. наук *В.И. Воронин*,
канд. биол. наук *Н.В. Дорофеев*,
д-р биол. наук *В.Н. Моложников*,
д-р с.-х. наук *Е.М. Рунова*

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов
Программы Президиума РАН “Живая природа: современное состояние
и проблемы развития” № 30.24 и “Биоразнообразие природных систем” № 1.29.12*

ISBN 978-5-906284-87-7

© Суворова Г.Г., Попова Е.В., 2015
© СИФИБР СО РАН, 2015
© Оформление. Академическое
изд-во “Гео”, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано, что глобальные климатические изменения вызваны главным образом увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере [IPCC, 2001, 2007]. В связи с этим изучение роли природных экосистем в регуляции газового состава атмосферы и особенностей круговорота углерода в наземных экосистемах становится весьма актуальным и имеет большое научное и прикладное значение. Исследованиями, посвященными этой проблеме, установлено, что важную роль в углеродном цикле планеты играют леса бореальной зоны [Кондратьев и др., 2003; Федоров, 2004; Коровин, 2005; Sedjo, 1992; Apps et al., 1993; Heath et al., 1993; Houghton, 1997; Goodale et al., 2002]. Они рассматриваются как нетто-сток CO₂. Наряду с этим большое значение имеет продуцирование ими фотосинтетического кислорода. В настоящее время осуществлена детальная оценка пулов, потоков и бюджета углерода в лесных экосистемах [Исаев и др., 1993; Алексеев, Берси, 1994; Карелин и др., 1994; Замолодчиков, Уткин, 2000; Нильссон и др., 2003; Усольцев и др., 2008; Щепаченко и др., 2008; Sundquist, 1993; Liski et al., 2000; Valentini et al., 2000, 2001; Gover et al., 2001; McGuire et al., 2001; Shvidenko, Nilsson, 2002; Woodall, Likens, 2008]. Исследована первичная брутто-продукция растительных экосистем мира [Hall et al., 1987; Sundquist, 1993], нетто-продукция биомов России [Голубятников, Денисенко, 2007; Моисеев, Алябина, 2007]. Традиционно изучение составляющих углеродного баланса лесов проводится с использованием экспериментальных данных и лесотаксационных материалов государственного учета лесного фонда. Однако работ, выполненных на основе эколого-физиологических методов, позволяющих оценить динамику фотосинтетического стока углерода и биологической продукции лесных экосистем в зависимости от факторов внешней среды, относительно немного [Тужилкина и др., 1988; Цельникер, Малкина, 1994; Воронин и др., 2000; Молчанов, 2007].

Монография посвящена изучению особенностей фотосинтетической продуктивности древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), произрастающих на территории Иркутской области, оценке их кислородопroduцирующей и CO₂-поглощительной функций. Здесь и далее под термином “хвойные древостои” мы понимаем сосновые, еловые и лиственничные древостои, занимающие 73 % лесопокрытой территории области.

Работа выполнена в лаборатории биоиндикации экосистем Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН. Авторы благодарят заведующего лабораторией, зам. директора СИФИБР СО РАН д-ра биол. наук В.И. Воронина за внимание к работе, сотрудников лаборатории кандидатов биол. наук Л.Д. Копытову, М.В. Иванову, В.А. Осколкова, а также Л.С. Янькову за помощь в проведении экспериментов. Особую признательность авторы выражают руководителям Министерства жилищной политики, энергетики и транспорта, Агентства лесного хозяйства Иркутской области и начальнику СЭБРИПР ОАО “Иркутскэнерго” Л.П. Галенской за сотрудничество.

1.1. Влияние факторов среды на интенсивность фотосинтеза растений

Изучение зависимости фотосинтеза древесных растений в природных условиях от воздействия факторов среды важно для понимания особенностей круговорота углерода в лесных экосистемах как основных компонентах регуляции углерода в глобальном масштабе.

Уже в первых эколого-физиологических исследованиях было показано, что изменения дневного хода фотосинтеза достаточно разнообразны и обуславливаются динамикой внешних факторов: световых условий местообитания растений, влажности воздуха, температуры воздуха и почвы и их сочетанием в течение дня, а также возрастом листа и особенностями сезонного развития растений [Цельникер, 1978; Физиология..., 1982; Молчанов, 1983; Цельникер и др., 1993; Grieu et al., 1988; Epron et al., 1992; Radoglou, 1996].

Для древесных растений освещенность – один из важных экологических факторов, влияющих на структуру и функциональную активность ассимиляционного аппарата [Цельникер, 1978; Ковалев, Антипова, 1983; Горышина, 1989; Загирова, 1999]. Все растения могут эффективно функционировать при изменении интенсивности света в диапазоне около трех порядков. Обычно листья поглощают 80–85 % падающего света в фотосинтетически активной области спектра (400–700 нм) [Орт и др., 1987]. Хлорофиллы имеют два максимума поглощения света – в синей (430–460 нм) и красной (650–700 нм) областях спектра, каротиноиды играют роль вспомогательных светособирающих пигментов в той части солнечного спектра (450–570 нм), где слабо поглощает хлорофилл [Физиология..., 1982].

Параметры световой зависимости фотосинтеза достаточно подвижны в течение дня, сезона, года, что отражает высокую динамичность процесса в целом [Чмора, 1966; Мокроносов, 1981; Голомазова, 1987; Молчанов, Татарина, 1993]. В то же время они могут быть видоспецифичными, так как показывают адаптацию вида к определенным световым условиям произрастания [Цельникер, 1978; Гармаш, Головки, 1997]. В 1944 г. П. Крамер установил, что фотосинтез семян дуба красного и белого, дуба флоридского и сосны ладанной быстро возрастал с увеличением интенсивности света. Фотосинтез сосны ладанной повышался до интенсивности света, эквивалентной полному солнечному. Однако у трех лиственных видов максимум фотосинтеза достигался при трети полного освещения или менее. Дальнейшее увеличение интенсивности света не усиливало процесс фотосинтеза. Сеянцы других лиственных деревьев, таких как клен красный и дуб крупноплодный, достигали максимума фотосинтеза при относительно низкой интенсивности света [Крамер, Козловский, 1963].

Тенденцию к световому насыщению фотосинтеза двухлетней хвои пихты С.В. Загирова [1999] выявила при 30–40 %, ели – при 60–70 % от максимальной освещенности. При дальнейшем увеличении интенсивности радиации скорость ассимиляции CO_2 у ели практически не менялась, а у пихты постепенно снижалась. У сосны светового насыщения фотосинтеза в отдельных случаях не наблюдалось.

Древесные растения характеризуются градиентом интенсивности фотосинтеза по высоте кроны. Основной фактор, влияющий на величину градиента, – свет. Одни авторы указывают на снижение интенсивности поглощения CO_2 с продвижением сверху вниз по кроне [Молчанов, 1983; Troeng, Linder, 1982]. Так, исследования, проведенные на некоторых хвойных (*Cryptomeria japonica* и *Chamaecyparis obtusa*, сосна смолистая, пихта бальзамическая, ели белая и Энгельмана), показали, что фотосинтез у световой хвои выше, чем у теневой, при пересчете на массу хвои и на ее объем или поверхность [Крамер, Козловский, 1963]. Другие авторы отмечают максимальный фотосинтез в средней части кроны [Забуга, Забуга, 1982; Ладанова, Тужилкина, 1992]. Например, интенсивность фотосинтеза теневых листьев теневыносливого бука европейского и клена сахарного выше, чем у световых листьев [Крамер, Козловский, 1963]. Причиной отсутствия единой точки зрения на этот вопрос, как полагают, могут быть индивидуальные характеристики дерева, экологические условия роста и особенности проведения эксперимента [Загирова, 1999].

Кроме интенсивности света для процесса фотосинтеза важен и качественный состав света. Для фотосинтеза наиболее эффективны красные и синие лучи, поскольку именно они соответствуют максимуму поглощения хлорофилла [Якушенкова и др., 2001].

От интенсивности света зависит пигментный состав фотосинтетического аппарата (ФСА) [Воронова и др., 2009]. Обычно листья содержат 400–600 мг хлорофилла на 1 м^2 [Butler, 1964]. Колебания в содержании хлорофилла сильнее влияют на поглощение в зеленой и дальней красной областях спектра, в которых хлорофилл поглощает слабо. Именно эти длины волн преобладают в затененных местообитаниях, где свет фильтруется через взаимно перекрывающиеся слои растительности [Tasker, Smith, 1977], и растения, приспособленные к сильному затенению, обычно отличаются более высокой концентрацией хлорофилла [Зотикова и др., 2001; Мутыгуллина, 2009; Bjorkman et al., 1972].

На ход световых кривых фотосинтеза влияют также изменения других факторов внешней среды. Влияние света на видимый фотосинтез сильнее в области низких температур [Попов и др., 2007]. Повышение концентрации CO_2 с увеличением освещенности приводит к росту скорости фотосинтеза.

Наличие воды – важный фактор для фотосинтеза. Водный дефицит у растений может возникать в течение дня, если транспирация превышает скорость поступления воды в лист, или он может носить сезонный характер, если в почве истощаются запасы влаги [Орт и др., 1987]. Максимальные значения видимого фотосинтеза отмечаются при небольшом водном дефиците листа (порядка 5–20 % от полного насыщения) при открытых устьицах.

Сильное обезвоживание может вызвать нарушение структуры хлоропластов и полную потерю их фотосинтетической активности.

Реакция фотосинтетического аппарата растения на атмосферную и почвенную увлажненность обусловлена работой устьичного аппарата и всасывающей силой корневой системы [Молдау, 1977; Коппель, 1981; Варлагин, Выгодская, 1993; Berninger et al., 1996]. Закрывание устьиц препятствует обезвоживанию листа после прекращения снабжения водой. При этом может повышаться температура листа, а транспорт электронов подвергается ингибированию [Орт и др., 1987].

В оптимальных условиях фотосинтез листа зависит от мезофильной проводимости, которая, в свою очередь, определяется ходом радиации (другие факторы на нее практически не влияют). У сосны обыкновенной лишь при незначительных изменениях внешних условий в течение дня доминирующей в регуляции фотосинтеза является мезофильная проводимость. В целом же на протяжении вегетации, особенно при ухудшении водоснабжения, устьичная проводимость доминирует в управлении скоростью фотосинтеза [Болондинский, 2004, 2008].

В течение вегетации доминирование устьичной и мезофильной проводимости в регуляции фотосинтеза может меняться. Исследования на сосне и ели показали, что мезофильные ограничения определяют уменьшение фотосинтеза при низком водном потенциале побегов в середине сезона, а устьичные ограничения более существенны к концу вегетации [Dang et al., 1997].

Влажность воздуха существенно влияет на фотосинтетическую продуктивность растений. С увеличением влажности воздуха от 30 до 80 % интенсивность фотосинтеза пихты европейской растет [Miller, 1959]. Среднесуточные значения фотосинтеза в летний период в кроне сосны существенно зависят от влажности воздуха [Загирова, 1999]. Скорость видимого поглощения углекислоты и его продолжительность в течение суток у хвой нижних участков кроны в дни с относительной влажностью воздуха ниже 50 % резко снижаются. В.К. Болондинским [2010] показано, что фотосинтез березы карельской во время атмосферной засухи уменьшался почти в два раза.

У дугласовой пихты с увеличением влажности воздуха интенсивность фотосинтеза постепенно возрастала. У сосны максимальная интенсивность фотосинтеза отмечалась при влажности 70 %, тогда как при влажности 50 и 90 % она уменьшалась примерно на 15 %. Береза и бук с изменением влажности от 50 до 90 % понижали интенсивность фотосинтеза незначительно, примерно на 5–10 % [Kunstle, Mitscherlich, 1975].

Подавляющее воздействие на фотосинтез оказывает недостаток влаги в почве [Голомазова, 1978; Молчанов, 1983]. У растений в состоянии водного стресса отмечается уменьшение квантового выхода фотосинтеза [Mohanty, Boyer, 1976] и снижение содержания пигментов [Alberte et al., 1977]. В Германии у деревьев 65-летнего елового насаждения с имитацией летней засухи в течение нескольких лет был отмечен опад хвои до 50 %, интенсивность ассимиляции была снижена на 20–25 % по сравнению с контролем, уменьшался прирост. После прекращения искусственной засухи фотосинтетическая продуктивность хвои быстро восстановилась и не отличалась от контроля-

ной [Dohrenbursch et al., 1999]. В сухих местообитаниях концентрация хлорофиллов и каротиноидов ассимилирующих органов ниже, чем в более влажных [Мутыгуллина, 2009].

В условиях недостаточного водообеспечения высокие уровни солнечной радиации и температуры воздуха могут быть ингибирующими для фотосинтеза. У сосны при максимальных значениях температуры воздуха и солнечной радиации интенсивность газообмена в день исследования составила 40 % от максимума [Молчанов, 2007].

Депрессия фотосинтеза может быть обусловлена изменением зависимости интенсивности фотосинтеза от солнечной радиации в течение дня. У сосны обыкновенной [Молчанов, 1983] и дуба черешчатого [Молчанов, 2002; Molchanov, 2000] при повышенном недостатке влаги депрессия фотосинтеза в течение дня наступала раньше даже при более низкой солнечной радиации. Подобные изменения дневного хода фотосинтеза наблюдались у дуба скального [Epron et al., 1992] и дуба сидячецветного [Roupsard et al., 1996].

На простой модели дневной фотосинтетической фиксации углерода показано, что поглощение CO_2 во время засухи в большей степени подавляется у световых листьев, чем у теневых [Diemer, Larcher, 2003].

Фотосинтез каждого вида растения характеризуется температурным оптимумом, который может смещаться в течение дня, во время вегетации, по мере изменения уровня освещения [Курец и др., 1983; Слемнев, 1996; Загирова, 1999]. У хвойных в условиях Сибири реакция нетто-фотосинтеза на температуру за период вегетации характеризуется несколькими оптимумами. При этом как количество оптимумов, так и особенности их проявления приурочены к воздействию внешних факторов и имеют выраженный видоспецифический характер [Суворова, 2009].

При оптимальном атмосферном содержании CO_2 и высокой интенсивности света нетто-фотосинтез обычно увеличивается с повышением температуры до критической точки, после которой начинает быстро снижаться. У большинства видов умеренной зоны интенсивность фотосинтеза увеличивается от температуры около 0°C и достигает максимального значения при $15\text{--}25^\circ\text{C}$. У сосны кедровой и европейской нетто-фотосинтез сеянцев увеличивался до $10\text{--}15^\circ\text{C}$, а затем уменьшался с повышением температуры. Приблизительно при 35°C листья выделяли CO_2 , что указывало на превышение дыхания над фотосинтезом [Крамер, Козловский, 1963].

Температура почвы, так же как и температура воздуха, влияет на фотосинтез: при низких значениях интенсивность поглощения CO_2 понижается. Этот эффект обусловлен главным образом уменьшением поглощения воды при низкой температуре, что часто приводит к закрыванию устьиц.

Высокая температура часто усиливает транспирацию, вызывая водный дефицит, вследствие чего закрываются устьица и сокращается снабжение хлоропластов углекислотой. Под влиянием высокой температуры и освещенности происходит уменьшение скорости видимого фотосинтеза [Дальке, Головки, 2001]. У лиственницы сибирской высокая температура подавляет истинный фотосинтез и усиливает дыхательную активность хвои. Воздействие

высоких температур воздуха приводило к уменьшению интенсивности фотосинтеза у сосны и ели на 27 и 33 % соответственно [Щербатюк и др., 1991]. В условиях прохладной влажной осени прослеживается зависимость фотосинтеза ели сибирской от температуры воздуха и почвы [Янькова и др., 2005]. Продуктивность фотосинтеза лиственницы сибирской непосредственно зависит от концентрации зеленых пигментов, которая, в свою очередь, регулируется температурой почвы [Филиппова и др., 2005].

Заметное влияние на видимый фотосинтез растений оказывает температура предшествующей ночи, изменяя как его уровень, так и температуру максимума. С повышением ночной температуры до определенного уровня интенсивность нетто-фотосинтеза возрастает, а его максимум сдвигается в сторону повышения освещенности и температуры [Дроздов и др., 2001].

Продолжительность активного фотосинтеза у хвойных видов зависит от температурных условий произрастания. Фотосинтетическая активность хвои второго года жизни ели проявляется уже в апреле, при температуре воздуха +3 °С [Ладанова, Тужилкина, 1992]. Для резко континентального климата период ассимилирующей активности хвои по сравнению с листопадными видами достаточно продолжительный. Так, в условиях Восточной Сибири фотосинтетическая активность хвои сосны и ели отмечается в течение семи месяцев – с первых чисел апреля до конца октября. В зависимости от условий суммарное поглощение CO₂ за весенний и осенний периоды, когда фотосинтез листопадных видов минимален или отсутствует, у вечнозеленых хвойных он достигает 30–70 % от годичной фотосинтетической продуктивности [Суворова, 2006]. С этой точки зрения участие хвойных древостоев в трансформации наземного цикла углерода еще не исследовано и представляется чрезвычайно важным.

1.2. Круговорот углерода в наземных экосистемах

Углеродный цикл занимает особое место в функционировании современной биосферы, поскольку вклад углеродсодержащих газов (главным образом диоксида углерода и метана) составляет порядка двух третей величины парникового эффекта, а эмиссии других парниковых газов коррелируют с основными параметрами углеродного цикла [Замолотчиков и др., 1997б; Ващук, Швиденко, 2006; Курганова, 2010].

В основе углеродного цикла лежат два процесса планетарного значения: фотосинтетическое связывание (или сток) углерода и его гетеротрофное высвобождение при биологическом разложении органического вещества [Мухин, Воронин, 2007].

Углерод, содержащийся в разных компонентах углеродного цикла, таких как атмосфера, океан, растительность, почва и прочие, принято называть углеродными резервуарами (carbon pools). Углерод, переходящий из одного резервуара в другой за некоторый период времени (обычно год), определяют как поток (carbon flux). Увеличение запаса (stock) углерода в наземной экосистеме называют депонированием, а потоки углерода из экосистемы в атмосферу – эмиссией. Кроме того, рассматривают вынос углерода в гидро- и

литосферу, определяемый как “боковой” транспорт (lateral transport). Разница входящих в резервуар и выходящих из него потоков углерода за конкретный промежуток времени характеризует бюджет углерода [Щепаченко и др., 2008].

Круговорот углерода в биосфере состоит из наземного и морского циклов, имеющих общую границу между океаном и атмосферой. Как суша, так и океан в годовом исчислении являются стоками атмосферного CO_2 , компенсируя около 50 % от его антропогенных эмиссий [Замолодчиков, 2003].

Круговорот, идущий в океане, в основном автономен. Диоксид углерода, растворенный в морской воде, усваивается фитопланктоном в процессе фотосинтеза, а кислород уходит в раствор. Зоопланктон и рыбы потребляют углерод, фиксированный в биомассе фитопланктона, а кислород используют при дыхании. В результате разложения органических веществ в пищевых цепях в воду возвращается CO_2 , усвоенный фитопланктоном [Ершов, 2004]. Транспорт CO_2 в океане происходит с океаническими течениями, и для обновления глубинных вод требуется 500–1000 лет [Кудеяров и др., 2007]. Океанический резервуар растворенного неорганического углерода традиционно считается основным поглотителем избытка атмосферного углерода [Горшков, Макарьева, 2002; Quay et al., 1992].

Характерной чертой круговорота углерода является наличие его активного обменного фонда в атмосфере в основном в виде CO_2 , среднегодовая концентрация которого в настоящее время составляет более 360 ppm*. Метан CH_4 – следующий по значению углеродсодержащий газ – присутствует в атмосфере в концентрации около 2 ppm. Окись углерода CO содержится в атмосфере в гораздо меньших количествах (~0,09 ppm). Концентрация углеродсодержащих газов в атмосфере постоянно возрастает. Наиболее высокими темпами повышается концентрация CO_2 . С 1992 г. за 10 лет содержание CO_2 в атмосфере увеличилось на 1,7 ppm [WMO..., 2005].

В последнее время большое значение придается изучению роли лесов в депонировании углерода, поскольку лесные экосистемы на длительный срок переводят углерод атмосферы в неактивное состояние, выводят его из круговорота [Одум, 1975; Титлянова, 1977; Цветков, Сурина, 2003; Коровин, 2005; Кашапов, Кулагин, 2008]. Углерод, содержащийся в виде CO_2 в атмосфере, может практически полностью пройти через растительность в течение 10 лет [Щепаченко и др., 2008].

В экосистемах лесов такие процессы углеродного цикла, как поглощение (сток), депонирование, выброс углерода в атмосферу (эмиссия), начинаются с фотосинтетической ассимиляции хлорофиллоносными растениями CO_2 в форме первичных ассимилятов. Далее углерод депонируется в фитомассе или детрите и освобождается в форме CO_2 и частично CH_4 . Освобождение углерода происходит обычно в процессе окисления (дыхания). Оно протекает как в зеленых растениях, так и в энергетически зависимых от них

* Здесь и далее используются обозначения относительных единиц: ppm = млн⁻¹ = 10⁻⁶ – пропромилле, 10 000 ppm = 1 %; Пг – петаграмм, 1 Пг = 10⁹ т; Тг – тераграмм, 1 Тг = 10⁶ т; Мг – мегаграмм, 1 Мг = 1 т; Гт – гигатонна, 1 Гт = 10⁹ т.

других многочисленных группах организмов – потребителей корма, называемых консументами [Бобкова, 2004].

Для оценки биосферной роли лесов, в частности углеродного бюджета лесных экосистем [Уткин, 1975; Whitaker, Woodwell, 1968], в качестве характеристик используются следующие показатели, измеряемые в единицах массы сухого вещества или углерода ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ или $\text{Мг}/(\text{га} \cdot \text{год})$): первичная брутто-продукция (фотосинтетическая продуктивность, gross primary production – GPP), первичная нетто-продукция (годовой прирост, net primary production – NPP), нетто-продукция экосистемы (net ecosystem production – NEP) [Родин, Базилевич, 1965], чистая биомная продукция (net biome production – NBP) [Schulze et al., 1998, 1999, 2004; Schimel et al., 2001].

Резервуары углерода

Резервуары углерода, которые в наибольшей степени влияют на природные потоки CO_2 и концентрацию его в атмосфере, сосредоточены в наземной растительной биомассе и почвенном органическом веществе, время пребывания углерода в них составляет соответственно несколько сотен и несколько тысяч лет [Кудеяров и др., 2007].

В наземных биоценозах мира запасы органического углерода оцениваются в 550 Гт ($550 \cdot 10^9 \text{ т}$) [IPCC, 2001]. Наиболее существенными биомассами Земли по сумме двух основных пулов углерода (запасам С в почве и фитомассе) являются тропические дождевые леса – 315,7 Гт, бореальные леса – 219,3 Гт, тундра, лесотундра, альпийские экосистемы, парамо – 204,4 Гт [Bolin, 1986; Billings, 1987; Melillo et al., 1993].

По данным А.З. Швиденко с соавт. [2009], экосистемы покрытых лесом земель лесного фонда России ($776,1 \cdot 10^6 \text{ га}$) содержат 188,8 Гт углерода, из которых 77,8 % находится в почве (в том числе 7,2 % в подстилке), 18,2 % в фитомассе и 4,0 % в древесном детрите. Отношение органического вещества почвы и растительности составляет 3,5:1,0. Подобным соотношением характеризуются лесные экосистемы США: в почве находится 52 % всего органического углерода, в фитомассе 35 % и в мертвом органическом веществе 14 % [Woodall, Likens, 2008].

По оценкам А.И. Уткина с соавт. [2001], леса России ежегодно накапливают около $218 \cdot 10^9 \text{ т С}$, из которых 16 % представлено запасами углерода в фитомассе и 84 % в почве.

Оценки запаса углерода в основных резервуарах лесных земель Иркутской области по состоянию на 2003 г. показали, что покрытые лесом земли области в среднем содержат 81,9 т/га углерода в растительном веществе, из которого фитомасса составляет 81,0 %, детрит (включающий над- и наземную древесину погибших деревьев и кустарников с диаметром в тонком конце более 1 см) – 9,1 %, и на подземную отмершую растительную органику (мертвые корни и пни) приходится 9,9 %. Значительное количество органического углерода содержится в почве – среднее содержание С для покрытых лесом земель составляет 155,8 т/га [Ващук, Швиденко, 2006].

Леса Иркутской области содержат огромное количество органического углерода: 5,1 млрд т в растительности и 9,7 млрд т в почве [Ващук, Швиден-

ко, 2006]. Эти величины значимы даже в глобальном масштабе: в целом они составляют 2,6 % органического углерода циркумполярной бореальной зоны и 0,6 % – всего земного шара [IPCC, 2000].

При оценке углеродного бюджета лесов в качестве резервуаров (хранилищ) углерода обычно рассматриваются три пула: фитомассы лесной растительности, детрита и почвенного гумуса [Коровин, 2005].

Устойчивый пул наземной фитомассы в основном формируется за счет древесной растительности, поскольку именно древесина деревьев и кустарников является долговременным хранилищем углерода с периодом его пребывания в десятки и сотни лет [Заварзин, 1992; Кудеяров и др., 2007]. Время жизни наземных частей травянистых растений обычно не превышает 1–2 лет.

В ходе исследований, проведенных в США, выявлено, что средняя доля содержания углерода в древесине и листве для хвойных видов составляет 51,14 и 51,70 % соответственно, для лиственных видов – 47,42 и 47,78 % [Данченко и др., 2010].

Оценки запасов древесины и фитомассы в лесных экосистемах России проводятся довольно регулярно, при этом пул углерода в лесной растительности представлен достаточно близкими значениями плотности – 30–36 т/га [Замолотчиков и др., 2005]. По оценке А.З. Швиденко с соавт. [2008а], в 2003 г. леса России содержали в фитомассе 34,45 Пг С ($34,45 \cdot 10^9$ т) со средней плотностью по стране 4,37 кг/м².

По данным дистанционного зондирования, пул углерода в древесной биомассе лесов России оценен в $24,39 \cdot 10^9$ т С для площади $642,2 \cdot 10^6$ га [Muneri et al., 2001]. Для покрытых лесом земель ($774,22 \cdot 10^6$ га) оценка составляет $33,7 \cdot 10^9$ т С [Замолотчиков и др., 2005].

Оценки фитомассы на территории России последних лет дают достаточно близкие результаты – 32–34 Пг С ($(32–34) \cdot 10^9$ т) [Исаев, Коровин, 1999; Shvidenko, Nilsson, 2002]. Согласно данным В.Н. Алексеева и Р.А. Берси [1994], это значение ниже – 28 Пг С. Другие оценки, лежащие в диапазоне от 42,1 до 69,5 Пг С ($(42,1–69,5) \cdot 10^9$ т), базировались на несовершенных методах, недостаточной или вторичной информации и содержали ряд ошибочных методических решений [Щепаченко и др., 2008].

В фитомассе тундровых и лесотундровых экосистем России, по оценке Д.В. Карелина с соавт. [1994], запас углерода составляет 2,735 Гт ($2,735 \cdot 10^9$ т), приблизительно 34,2 % от мировых запасов углерода в живой фитомассе.

По данным Л.Н. Вашука и А.З. Швиденко [2006], фитомасса покрытых лесом земель Иркутской области (совместно с Усть-Ордынским Бурятским автономным округом) в 2003 г. содержала 3501,2 млн т С со средней плотностью 55,7 т/га, что почти на 30 % выше средней величины для всех покрытых лесом земель России [Shvidenko, Nilsson, 2003]. Распределение фитомассы по фракциям типично для средне- и южнотаежных лесов. Древесный ярус содержит 94,9 % всей фитомассы лесных экосистем, из которых 60,2 % в стволах деревьев, 9,5 % занимает древесина кроны, 21,6 % – корни деревьев. На долю листьев и хвои крупных древостоев приходится 3,6 % фитомассы, подроста и подлеска – 1,5 % и живого напочвенного покрова – 3,6 %.

Фотосинтетический аппарат всех зеленых частей лесных экосистем в целом составляет 5,5 % [Ващук, Швиденко, 2006].

Вторым по величине наземным резервуаром углерода после живой фитомассы лесов является древесный детрит – остатки сухостоя, валежа, пней, сухих ветвей живых деревьев, отмерших корней, а также остатки, погребенные в почвенной толще. Особо выделяются здесь фракции крупных древесных остатков (КДО) и подземного детрита. Опад зеленых частей, генеративных органов, а также мелкие обломки ветвей (диаметром $D < 1$ см в толстом конце) относят к лесной подстилке, которая рассматривается как почвенное тело [Швиденко и др., 2008а, 2009]. Время пребывания углерода в этом пуле может исчисляться десятками и сотнями лет [Кудеяров и др., 2007].

Запасы углерода в КДО покрытых лесом земель лесного фонда России оценены в 4,56 Пг С ($4,56 \cdot 10^9$ т), или 5,9 Мг/га (5,9 т/га). Из общего количества углерода 4231 Тг С ($4231 \cdot 10^6$ т) сосредоточено в резервуаре “медленной” скорости разложения КДО ($D > 8$ см), а остальное – в резервуаре умеренной скорости ($1 \text{ см} < D \leq 8$ см). Общее количество подземного детрита (кроме древесины, погребенной в почве) составляет 3,83 Пг С ($3,83 \cdot 10^9$ т). Из этого количества 3,03 Пг С ($3,03 \cdot 10^9$ т) находится на покрытых лесом землях лесного фонда, что составляет 3,91 Мг/га (3,91 т/га) [Швиденко и др., 2009].

Почвенный резервуар органического углерода является одним из главных долговременных резервуаров углерода на планете. По времени нахождения углерода в почве его делят на фракции: “быстрого” углерода (подстилки – время фиксации 2 года), “лабильного” (время нахождения – 480 лет) и “стабильного” (1350 лет). Было принято, что доля стабильного углерода составляет для всех почв 40 % от общего содержания [Щепаченко и др., 2008].

Э.Ф. Ведрова с соавт. [2002], Ф.И. Плешиков с соавт. [2002] по устойчивости к биоразложению различают две фракции органического вещества: легкоминерализуемую (ЛМОВ) и устойчивую (стабильную). Фракция ЛМОВ представлена двумя формами: лабильное (ЛОВ) и подвижное (ПОВ) органическое вещество. Основными составляющими ЛОВ в лесных экосистемах являются лесная подстилка на поверхности почвы, специфическим компонентом которой служат отпавшие стволы деревьев, и мертвый корневой материал в минеральном профиле. Подвижные формы ОВ объединяют органические продукты растительных остатков и гумуса, легко переходящие в растворимое состояние. Фракция ЛМОВ – источник формирования минерализационного потока углерода в атмосферу и синтеза нового гумуса.

Запасы углерода в почвах Земли составляют 1500 Пг ($1500 \cdot 10^9$ т), из них 455 Пг ($455 \cdot 10^9$ т) – в торфах, примерно в 3 раза выше его содержание в фитомассе ($(500-600) \cdot 10^9$ т) и в 2 раза – в атмосфере ($700 \cdot 10^9$ т) [Post et al., 1990; Gorham, 1991].

В лесных почвах содержится около 34 % всего почвенного углерода на планете [Post et al., 1982]. По данным [Liski, Westman, 1995], запасы углерода в лесных почвах южной Финляндии для органогенных горизонтов и метрового минерального слоя составляют от 4,0 до 11,9 кг/м². В более глубоких слоях, до уровня грунтовых вод, содержится 1,3–2,4 кг/м², что составляет 18–28 % от общего запаса углерода почв. В лесах США на долю почв прихо-

дится около половины запасов углерода [Turner et al., 1997] и на подстилку около 6 % [Щепаченко и др., 2008]. В лесах Норвегии запас почвенного углерода варьируется в пределах 140–190 т/га, включая 3–7 т/га в слое лесной подстилки [Wit, Kvindesland, 1999].

Оценки запасов углерода в лесных почвах России многочисленны и достаточно противоречивы – от 74 Пг [Алексеев, Берси, 1994] до 200 Пг ((74–200)·10⁹ т) [Kolchugina, Vinston, 1993] для покрытых лесом земель. По оценкам О.В. Честных с соавт. [1999], общий запас углерода в почвах земель лесного фонда России составляет 172,4 Гт (172,4·10⁹ т).

Потоки углерода

Для оценки бюджета и баланса углерода лесных биомов значимыми наряду с пулами являются углеродные потоки [Уткин и др., 2003]. Баланс потоков углекислого газа складывается из таких разнонаправленных потоков, как брутто-продукция (фотосинтетическая продукция), чистая первичная продукция, дыхание растений, выделение CO₂ в результате жизнедеятельности почвенных микроорганизмов и разложения почвенной органики [Мухин, Воронин, 2007].

В мире годовую продукцию фотосинтеза (GPP) оценивают в 90–120 Гт С–CO₂ ((90–120)·10⁹ т), из которых около половины расходуется на дыхание самих растений [Кудеяров, 1995; Hall et al., 1987; Houghton, Scole, 1990]. Леса как часть биомов суши ежегодно поглощают более половины общего количества CO₂, связываемого в фотосинтезе наземными растениями, или 31,9 Гт С (31,9·10⁹ т) [Sundquist, 1993]. По масштабам поглощения углерода и, особенно, по размерам его длительного аккумуляирования леса признаются наиболее надежной системой предотвращения парникового эффекта [Коровин, 2005; IPCC, 2000].

Один из главных потоков обмена углерода между экосистемами и атмосферой – чистая первичная продукция (NPP), которая определяет степень влияния растительности на глобальный углеродный бюджет [Швиденко и др., 2008б]. Величина NPP служит приходной статьей баланса углерода, характеризует продуцирование атмосферного углерода в тканях растений в процессе фотосинтетической ассимиляции [Трефилова, 2007].

Наземной растительностью ежегодно поглощается около 55–60 Пг С ((55–60)·10⁹ т) в виде чистой первичной продукции [Щепаченко и др., 2008]. Существующие оценки NPP лесов России различаются более чем в два раза (от 204 до 614 г/(м²·год)) [Замолотчиков, Уткин, 2000; Моисеев, Алябина, 2007; Gover et al., 2001; Shvidenko, Nilsson, 2003].

По расчетам Б.Н. Моисеева и И.О. Алябиной [2007], чистая первичная продукция углерода во всех биомах России составляет 2745 млн т/год. По данным А.З. Швиденко с соавт. [2008б], общая NPP всех российских лесов оценивается в 2308 Тг/год (2308·10⁶ т). Из этого общего количества 20,5 % приходится на надземную древесину (из них 14,9 % в древесине стволов). Больше половины NPP размещается в листьях (хвое) деревьев (27,7 %) и корнях (28,7 %), главным образом тонких ($D < 2$ мм).

По оценке А.С. Исаева с соавт. [1993], при общей площади земель лесного фонда России, равной 1183 млн га, годовое депонирование углерода составляет 212 млн т/год, в том числе около 10 % приходится на не покрытую лесом и нелесную площади. По оценке Д.Г. Замолотчикова с соавт. [2005], среднегодовое депонирование С в лесах России определено в $252 \cdot 10^6$ т/год.

Расчеты, выполненные с использованием базы данных экспериментальных значений первичной биологической продукции фитоценозов России [Базилевич, 1993], показали, что для лесных фитоценозов европейской части России характерно изменение значений NPP в диапазоне от 4,3 т/(га·год) (северотаежные сосновые леса) до 13,6 т/(га·год) (приуральские липовые леса). Продуктивность лесов Сибири и Дальнего Востока изменяется в диапазоне от 3 т/(га·год) (заросли кедрового стланика и ольховника) до 11 т/(га·год) (дальневосточные дубовые леса) [Голубятников, Денисенко, 2007].

Чистая первичная продукция покрытых лесной растительностью земель Иркутской области в 2003 г. оценена в 198,1 млн т углерода в год, что составляет 3,15 т/(га·год). Средняя величина NPP хвойных лесов составляет 3,25 т/(га·год) с колебаниями от 2,68 т/(га·год) (сосна) до 4,06 т/(га·год) (кедр), а мягколиственных – до 3,28 т/(га·год) [Ващук, Швиденко, 2006].

Наряду с фотосинтезом полноправным элементом продукционного процесса является дыхание ассимилирующих и неассимилирующих органов [Семихатова, 1990, 2000; Семихатова, Николаева, 1996; Головкин, 1999; Молчанов, 2007]. Для леса это имеет большое значение в связи с тем, что масса неассимилирующих органов у деревьев достаточно велика и с возрастом все более увеличивается. По мере старения доля углерода, расходуемого на дыхание, возрастает [Makela, Valentine, 2001].

В ранних расчетах соотношения количества вещества, образованного при фотосинтезе и потраченного на дыхание, было установлено, что средневозрастное дерево тратит на дыхание около 60 % углерода, поглощенного при фотосинтезе [Boysen-Iensen, 1932]. Близкие к этому цифры были получены для деревьев, растущих в разных климатических условиях [Цельникер, Молчанов, 2005].

Поток углерода, связанный с отмиранием и перемещением органического вещества в детритный пул, может быть представлен тремя секциями [Бобкова, 2004]: 1) продукция лесной подстилки (или годичный опад); 2) усыхание деревьев по разным причинам – годичный отпад; 3) продуцирование крупных древесных остатков, представленных в экосистемах валежом, в том числе за счет сучостоя.

Как показывает недавняя детальная оценка продуктивности [Кудеяров и др., 2007], отпад в лесах России значителен и составляет на начало нынешнего тысячелетия $742 \cdot 10^6$ м³/год, или 0,96 м³/(га·год). Согласно второй оценке (сделанной только для лесов Министерства природных ресурсов РФ, занимающих площадь $733,1 \cdot 10^6$ га), среднее значение составляет 0,92 м³/(га·год) [Швиденко и др., 2008а].

Гетеротрофное дыхание (ГД) – расходная статья баланса, показывающая, какое количество углерода ежегодно возвращается в атмосферу [Трефи-

лова, 2007]. Гетеротрофное дыхание лесных экосистем включает два основных компонента: гетеротрофное дыхание почв и поток CO_2 , обусловленный разложением наземной и надземной древесины, который обычно не включается в почвенное ГД [Ваганов и др., 2005; Щепаченко и др., 2008]. Поток CO_2 вследствие разложения древесины зависит от количества отпада средней (в верхнем конце D от 1 до 8 см) и крупной ($D > 8$ см) надземной и наземной древесины [Щепаченко и др., 2008]. Дыхание почвы определяется как суммарная продукция углекислого газа в результате дыхания корней растений, почвенных микроорганизмов и животных. Основной вклад в продукцию CO_2 (более 90 %) вносят микроорганизмы и корни растений [Кудеяров и др., 2007].

На основе непрерывных 11-летних мониторинговых наблюдений за эмиссией CO_2 были получены оценки его сезонных и годовых потоков из почв южно-таежной зоны России. В зависимости от типа растительности среднемноголетние годовые потоки CO_2 из дерново-подзолистой и серой лесной почв изменялись от (381 ± 78) до (809 ± 100) г/(м²·год), а их межгодовая вариабельность составляла 13–21 % для почв естественных экосистем и 33–37 % для почв агроценозов [Курганова, 2010]. Для сравнения: в агроэкосистемах южных районов Иркутского региона среднемноголетняя величина потока CO_2 в атмосферу изменяется от 173 г/(м²·год) (пар) до 229 г/(м²·год) (посевы яровой пшеницы) [Помазкина и др., 2013].

При расчетах баланса углерода для отдельных регионов немаловажным компонентом является антропогенная эмиссия CO_2 (сжигание топлива, продукция аграрного сектора, заготовка и разложение древесины, добыча торфа, лесные пожары и болезни, известкование почв и др.), а также, условно говоря, “вторичная антропогенная эмиссия CO_2 ”, вызванная техногенным загрязнением почв и атмосферы и проявляющаяся в усилении эмиссии CO_2 из загрязненных почв агропромышленного комплекса [Помазкина и др., 2008а,б; Помазкина, 2011] и в снижении CO_2 -ассимиляционной активности лесных экосистем в окрестностях промышленных центров [Михайлова и др., 2006, 2015].

Годичное депонирование углерода на землях государственного лесного фонда РФ ($211,64 \cdot 10^6$ т) компенсирует примерно 30 % [Кокорин, 1996] или всю эмиссию антропогенных выбросов CO_2 в стране [Филипчук, Моисеев, 2003], а масштабы депонирования углерода хвойными лесами на территории РФ составляют 56 % его общего депонирования лесами России – всего $167,16 \cdot 10^6$ т/год по группам пород [Исаев и др., 1993]. В то же время известно, что в зависимости от природной и экономической ситуации леса могут быть не только хранителем (стоком, резервуаром) углерода, но и его источником [Carrara et al., 2003; Harmon et al., 2004].

Баланс углекислого газа в лесных экосистемах

Три основных потока – чистая первичная продукция, гетеротрофное дыхание и поток, обусловленный антропогенными причинами (потребление растительных продуктов и антропогенные нарушения природной среды), –

определяют величину чистой биомной продукции (ЧБП или NBP) как численного выражения полного углеродного бюджета [Нильссон и др., 2003].

Современные методы оценки углеродного бюджета лесной растительности на больших территориях включают два взаимосвязанных подхода: исследование изменения количества органического углерода в основных резервуарах лесных экосистем (фитомассе, мертвом органическом веществе растительности, почве) во времени и оценка потоков С между резервуарами экосистем, атмосферой, гидросферой и литосферой [Щепаченко и др., 2008].

Конечным выражением углеродного бюджета лесных пространств является чистая биомная продукция, которая вычисляется в единицах массы углерода для больших территорий и за относительно длительный (не менее года) период времени. В численном выражении NBP равна разности между чистой первичной продукцией (NPP) и четырьмя расходными потоками – гетеротрофного дыхания почв, потока С, формирующегося в результате разложения подземной и наземной фракций древесины, потока, обусловленного природными и антропогенными нарушениями в лесных экосистемах, а также транспорта углерода в гидро- и литосферу [Ващук, Швиденко, 2006].

Знание величин резервуаров С часто бывает очень важным, например, при оценке эмиссий углерода вследствие нарушений или при прогнозных оценках влияния климатических изменений на углеродный бюджет.

Бюджет углерода на уровне субъектов Российской Федерации [Филипчук, Моисеев, 2003] определяется выражением

$$B(C) = NEP(C) - Эр - Эп - Эв - Эсо - Эсд,$$

где $B(C)$ – бюджет углерода в лесах региона (субъекта РФ); $NEP(C)$ – суммарная чистая продукция углерода лесных экосистем в регионе; $Эр$ – вывоз (эмиссия) углерода древесины, заготовленной в результате рубок главного пользования, рубок ухода и прочих рубок; $Эп$ – эмиссия углерода древесины и подстилки, сгоревших во время лесных пожаров; $Эв$ – эмиссия углерода фитомассы в очагах вредителей и болезней леса; $Эсо$ – эмиссия углерода при сжигании (и окислении) древесных отходов и потерь на лесосеках, лесовозных дорогах, верхних и нижних складах; $Эсд$ – эмиссия углерода при сжигании отопительных дров, заготовленных в лесу сельским населением самостоятельно.

Биомная продукция (NBP) наземных экосистем мира оценивается на уровне 1–2 Гт/год $((1-2) \cdot 10^9$ т), что составляет около 1 % от продукции фотосинтеза (GPP). Это разность между приходной частью углеродного цикла $(120 \cdot 10^9$ т/год) и его расходными статьями на уровнях фитоценоза $(60 \cdot 10^9$ т/год), экосистемы $(50 \cdot 10^9$ т/год) и биома $((8-9) \cdot 10^9$ т/год) [Нильссон, 1999; Усольцев и др., 2008].

Исследования, проведенные многими авторами в лесах земного шара [Liski et al., 2000; Valentini et al., 2000; McGuire et al., 2001], показывают, что годичный баланс углерода в лесах разных широт колеблется от –6,6 т/га (т. е. поглощается 24 т/га CO_2) до +1,0 т/га (соответствует выделению 3,7 т/га CO_2). Баланс CO_2 изменяется в зависимости от географической широты мес-

та [Valentini et al., 2001]. При этом тропики практически нейтральны в отношении баланса углерода, в странах умеренного климата баланс углерода неустойчив, а в экосистемах севернее тропиков существует устойчивый сток С [McGuire et al., 2001].

Умеренные и бореальные леса мира практически всеми исследователями рассматриваются как поглотитель углерода, хотя оценки достаточно разнообразны – 0,2 Пг/год ($0,2 \cdot 10^9$ т С) для лесов умеренного пояса [Heath et al., 1993], 0,7 Пг/год ($0,7 \cdot 10^9$ т С) для всех умеренных и бореальных лесов за последние 20 лет [Sedjo, 1992], 0,6–0,7 Пг/год ($(0,6–0,7) \cdot 10^9$ т С) для всех бореальных лесов и редколесий в начале 1990-х гг. [Goodale et al., 2002].

В последние годы оценка углеродного баланса территории Российской Федерации все чаще привлекает внимание ученых, поскольку благодаря огромной площади наземные экосистемы нашей страны играют значительную роль в глобальном цикле углерода [Курганова, 2010].

Международным институтом прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) была осуществлена оценка полного углеродного бюджета территории России за весь период существования данных государственного учета лесного фонда начиная с 1961 г. Было показано, что в среднем за этот период покрытые лесом территории России обеспечивали депонирование углерода в размере 433 млн т/год, из которых 153 млн т/год – в фитомассе, 57 млн т/год – в древесном детрите и 223 млн т/год – в почве [Shvidenko, Nilsson, 2002]. В среднем за год в пятилетие 1988–1992 гг. (стартовый период Киотского протокола) растительные экосистемы России изымали из атмосферы углерода 351 млрд т/год, из которых 269 млн т/год составило приращение экосистемных резервуаров углерода, а 82 млн т/год было вынесено в гидро- и литосферу, т. е. в основном удалено из биологического кругооборота [Нильссон и др., 2003].

Оценка баланса углерода наземных экосистем России, полученная исследователями для 2005 г., характеризуется величиной 0,49 млрд т/год, что свидетельствует о преобладании стока углерода над его потерями [Курганова, 2010]. Баланс углерода для территории России на 2005–2006 гг. оценивается приблизительно в 0,9 млрд т/год. Таким образом, земли РФ выступают абсолютным стоком диоксида углерода атмосферы. Неопределенность данной оценки высока и составляет не менее 50 % [Курганова, 2010]. Б.Н. Моисеев и И.О. Алябина [2007] также определили, что углеродный баланс биомов России положительный. По их оценке, он составляет более 630 млн т С в год. Наибольший вклад дают леса средней тайги – 206 млн т С в год.

2.1. Изменение концентрации углекислого газа в атмосфере

Мировое сообщество обеспокоено потеплением приземного слоя атмосферы, которое связывают главным образом с парниковым эффектом. Существование проблемы изменения климата признано на межправительственном уровне, что выразилось в заключении Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992 г.) и Киотского протокола (1997 г.) в дополнение к ней.

Величина парникового эффекта определяется наличием и концентрацией в воздухе так называемых парниковых газов (СО₂, СН₄, N₂O и др.), препятствующих прохождению солнечных лучей, отражаемых от поверхности земли. В настоящее время считается, что доминирующую роль в формировании парникового эффекта играет углекислый газ СО₂ [Шутов, Рябинин, 2009].

По данным исследователей, в течение многих тысяч лет содержание диоксида углерода в атмосфере Земли изменялось незначительно [Кондратьев и др., 2003; Гулев и др., 2008; IPCC, 2001, 2007]. На основе изучения отношений изотопов бора в раковинах древних фораминифер [Pearson, Palmer, 2000], последующей оценки изменения кислотности (рН) поверхностного слоя воды Мирового океана и реконструкции содержания углекислого газа в атмосфере за последние 60 млн лет было доказано, что за этот период изменения концентрации СО₂ не превышали одного порядка.

Судя по результатам анализа ледяного керна, взятого на антарктической станции Восток [Petit et al., 1999], в течение последних 400 тысяч лет уровень СО₂ в атмосфере Земли испытывал четырехкратные циклы колебаний. При этом содержание углекислого газа изменялось в пределах от менее 200 до 300 ppm. Современное его содержание выросло на протяжении XX в. с 280 до 360 ppm, что соответствует диапазону колебаний между максимумом последнего оледенения – 190 ppm (18 тыс. лет назад) и оптимумом голоцена – 280 ppm. Эти данные свидетельствуют, что скорость современного изменения концентрации СО₂ выше, что может указывать на антропогенный фактор в содержании углекислого газа в атмосфере [Кондратьев и др., 2003].

В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК – Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) отмечается, что концентрация основных парниковых газов на границе третьего тысячелетия достигла максимальных из зарегистрированных за весь период значений и продолжает повышаться. С доиндустриального времени (1750 г.) по 2005 г. концентрация СО₂ увеличилась на 35 % (с 280 до 379 ppm) [IPCC, 2007].

По данным [Национальный доклад..., 2002], суммарный ежегодный мировой объем выбросов парниковых газов в настоящее время оценивается в 25,7 млрд т эквивалента CO_2 , из которых более 25 % составляют выбросы США, около 25 % – стран Европейского союза, 14 % – Китая и более 7 % – Российской Федерации. Учитывая рост промышленного производства и энергопотребления в мире, в 2015 г. объем антропогенных эмиссий парниковых газов всех развивающихся стран сравняется с их выбросами в развитых странах и суммарно с развитыми странами составит около 30 млрд т в год в эквиваленте CO_2 [Национальный доклад..., 2002].

Приблизительно три четверти увеличения атмосферной концентрации CO_2 в последние годы обусловлено сжиганием ископаемых видов топлива, а остальная часть приходится преимущественно на изменения в землепользовании, включая обезлесение [Федоров, 2004; Щепаченко и др., 2008]. Так, с 1980 по 1990 г. ежегодное увеличение эмиссии углерода в результате сжигания ископаемого топлива составило в среднем $84 \cdot 10^6$ т. С 1991 по 1996 г. этот прирост был несколько ниже – $83 \cdot 10^6$ т. Глобальная эмиссия CO_2 в 2000 г. достигла $6,85 \cdot 10^9$ т [Кондратьев и др., 2003; Замолдчиков, 2005; Пятое... сообщение..., 2010].

Эмиссия углерода за счет сжигания ископаемого топлива на территории России в 2000 г. составила $420 \cdot 10^6$ т, за счет вырубки лесов – $40 \cdot 10^6$ т, лесных пожаров – $35 \cdot 10^6$ т, эрозии почв – $70 \cdot 10^6$ т. Соответственно суммарная эмиссия в результате хозяйственной деятельности достигла $565 \cdot 10^6$ т. В результате доля России в глобальной эмиссии углерода за счет всех видов хозяйственной деятельности приближается к 6 % [Кондратьев и др., 2003].

2.2. Изменения климатических показателей

Согласно оценкам [IPCC, 2007], среднегодовая температура атмосферного воздуха в приземном слое за 1906–2005 гг. выросла в целом на $0,74$ °C. Анализ палеоклиматических данных показал, что скорость роста температуры Северного полушария в течение прошедшего столетия была значительно выше, чем характерные ее скорости за последние два тысячелетия [Mann, Jones, 2003].

Линейный тренд температуры за последние 50 лет ($0,13$ °C за 10 лет) был примерно в два раза выше, чем за прошедшее столетие. Одиннадцать из 12 наиболее теплых лет, зафиксированных за всю историю (с 1850 г.) инструментальных измерений климатических показателей, приходятся на 1995–2006 гг. [Щепаченко и др., 2008].

Потепление сильнее проявилось в росте минимальных (ночных) температур, чем максимальных дневных значений. Во многих регионах, особенно в Арктике, потепление уже составило несколько градусов [Третье... сообщение..., 2002; IPCC, 2001]. В Арктике в течение нескольких последних десятилетий температура воздуха увеличивалась примерно вдвое быстрее, чем в среднем на планете [Щепаченко и др., 2008]. Кроме того, рост температуры существенно неравномерен по сезонам. Для зимних и весенних месяцев в Северной Америке, Западной Европе, Восточной Сибири в среднем за по-

следние 30 лет потепление составляло более 1 °С за десятилетие [Кокорин, 2005].

Основные черты глобальных изменений температуры выявлены как для территории России в целом, так и для отдельных регионов (рис. 1). По данным сети Росгидромета, за последние 100 лет (1907–2006 гг.) потепление в РФ составило 1,29 °С [Оценочный доклад..., 2008], по данным IPCC – 0,9 °С [IPCC, 2001].

Начало современного потепления в большинстве регионов РФ относится к первой половине 1970-х гг. (см. рис. 1). С 1976 по 2001 г. скорость потепления составила +0,46 °С/10 лет [Изменение климата..., 2002].

Тренд повышения среднегодовых значений температуры особенно выражен на территории Средней Сибири, Прибайкалья, Забайкалья, Приамурья и Приморья. Потепление на территории России более заметно в зимний и весенний сезоны [Груза, Ранькова, 2002]. Зимнее потепление характерно для европейской части России, где составляет более 1,0 °С за 10 лет, и в Приамурье–Приморье. Весной же самое интенсивное потепление наблюдается в Сибири и на Северо-Востоке. Осеннее потепление в большинстве регионов (кроме крайних восточных – Приамурья и Приморья, Северо-Востока) выражено очень слабо. В Западной Сибири, наоборот, произошло понижение температур осеннего сезона [Изменение климата..., 2002].

Во второй половине XX в. годовые и сезонные (кроме зимних) осадки в целом по России уменьшились [Груза, Ранькова, 2002]. Для европейской части России отмечена слабая тенденция роста осадков [Голубятников, Дени-

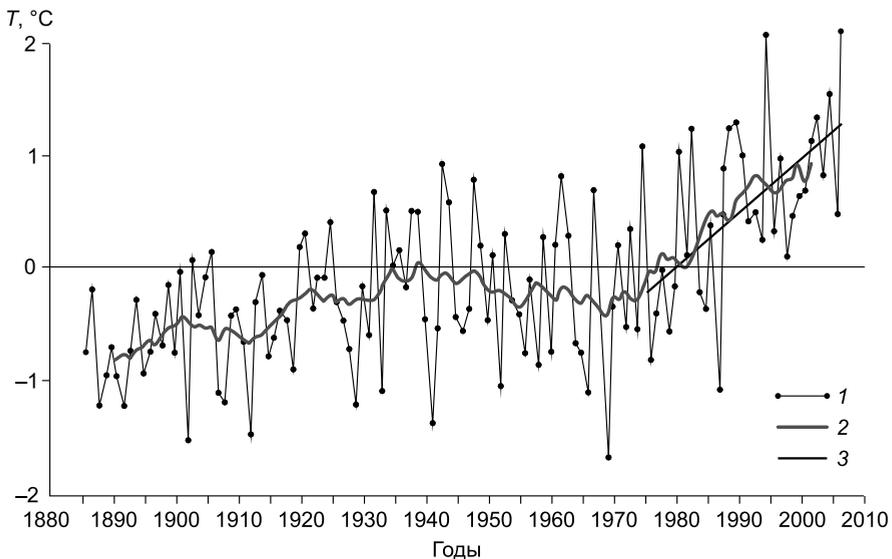


Рис. 1. Отклонения среднегодовой температуры приземного воздуха, осредненные по территории России за 1887–2007 гг. [Доклад..., 2008].

1 – отклонение температуры по сравнению со средними за 1961–1990 гг.; 2 – 11-летнее скользящее среднее; 3 – линейный тренд за 1976–2007 гг.

сенко, 2007]. Наибольшее уменьшение осадков наблюдается в Северо-Восточном регионе России. Так, изменение климата в Забайкалье и Западной Сибири можно охарактеризовать как потепление, сопровождающееся уменьшением количества осадков. При этом в Западной Сибири повышение среднегодовой температуры воздуха происходит за счет снижения суровости зимнего периода [Мещерская и др., 2009].

С целью определения темпов изменения климата на территории Иркутской области Л.Н. Ващук и А.З. Швиденко [2006] провели анализ динамики за 1960–2003 гг. продолжительности вегетационного периода, суммы температур, количества осадков и гидротермического коэффициента Селянинова. Изменение большинства указанных показателей статистически значимо во всех экорегионах области, в среднем тенденции сильнее проявляются в северной ее части. Средние годовые температуры выросли во всех экорегионах (примерно на 1,5 °С за рассматриваемый период), годовое количество осадков имеет тенденцию к уменьшению. Во всех экорегионах наблюдается уменьшение сумм эффективных температур и, за некоторым исключением, снижение количества осадков за вегетационный период. Эти противоположные тенденции находят отражение в уменьшении гидротермического коэффициента, т. е. в увеличении сухости климата практически по всей территории области. Отмечается тенденция некоторого сокращения вегетационного периода, что свидетельствует об усиливающейся изменчивости климата и, следовательно, об ухудшении условий для произрастания лесов на большей части территории области. К концу рассматриваемого периода изменчивость климатических показателей увеличивается.

Глобальные изменения климата в настоящее время проявляются в аномалиях биосферы. Так, спутниковые данные показывают, что ледовый покров в северных морях с 1978 г. уменьшается на 2,7 % в год. Температура на поверхности слоя вечной мерзлоты в Арктике в целом возросла примерно на 3 °С по сравнению с 1980-ми гг. Существенно уменьшились площади сезонномерзлых территорий [Щепаченко и др., 2008]. По данным [Национальный доклад..., 2002], за последние 25–30 лет температура слоя вечной мерзлоты на территории России повысилась на 1,0–1,5 °С, при этом температура воздуха возросла на 1,0–2,5 °С.

Уровень Мирового океана в 1961–2003 гг. увеличивался на 1,8 мм в год. Средняя температура океана после 1960-х гг. выросла вплоть до глубины 3000 м, и 80 % поступившего в климатическую систему Земли тепла было поглощено Мировым океаном [Щепаченко и др., 2008].

Опираясь на результаты многочисленных моделей в рамках основных сценариев прогнозного развития мира, МГЭИК приходит к выводу, что в течение XXI в. концентрация углекислого газа в атмосфере может удвоиться. Рост средней температуры приземного слоя атмосферы может составить 1,4–5,8 °С. В большей степени потепление затронет Северное полушарие, в частности зону распространения бореальных лесов. Хотя многие модели прогнозируют также повышение количества осадков в лесной зоне Северной Евразии, неопределенности прогноза остаются значительными. Высока ве-

роятность более частого возникновения неблагоприятных природных явлений, таких как засухи, сильные ливни, экстремальные паводки [IPCC, 2007].

Прогнозируемое повышение температуры воздуха на Севере России в первой четверти XXI в. составит 1–2 °С и может достичь 3–4 °С к середине столетия. При таком изменении климата площадь вечной мерзлоты сократится на 12–15 %, а ее граница сместится к северо-востоку на 150–200 км. Глубина сезонного протаивания увеличится в среднем на 20–30 %, а на арктическом побережье и в отдельных районах Западной Сибири – до 50 %. В Западной Сибири (Ямал, Гыданский полуостров) температура мерзлых грунтов повысится в среднем на 1,5–2,0 °С (с –5...–6 до –3...–4 °С). Возникнет опасность формирования высокотемпературных мерзлых грунтов даже в районах Арктики [Национальный доклад..., 2002].

2.3. Поглощение углекислого газа лесами бореальной зоны

В настоящее время около половины эмиссионного углекислого газа остается в атмосфере [Forster et al., 2007]. Из 480 Гт углерода, выброшенных в атмосферу за 200 лет, океан поглотил 26 %, экосистемы суши – 34 %, в атмосфере осталось 40 % [House et al., 2002; Ecosystems..., 2005].

Многие исследователи, в том числе МГЭИК, признают, что по масштабам поглощения углерода и, особенно, по длительности депонирования леса являются наиболее надежной системой предотвращения парникового эффекта [Коровин, 2005; Щепаченко и др., 2008; Шутов, Рябинин, 2009; Dixon et al., 1994; IPCC, 2001, 2007]. В глобальном масштабе в последние десятилетия леса бореальной зоны рассматриваются как нетто-сток CO₂ [Кондратьев и др., 2003; Федоров, 2004; Коровин, 2005; Sedjo, 1992; Heath et al., 1993; Houghton, 1997; Goodale et al., 2002].

В зоне бореальных лесов сконцентрировано около четверти общего запаса органического углерода почв и растительности [Forest area..., 2001]. В отличие от лесных экосистем тропических и субтропических зон, бореальные леса образованы небольшим числом видов деревьев и характеризуются замедленным биологическим круговоротом. В связи с этим они могут депонировать углерод на длительных временных промежутках не только в фитомассе, но и в древесном детрите, гумусе и торфах, разложение которых замедленно. Специфической чертой бореальных лесов является длительный жизненный цикл (около 200–500 лет) основных лесобразующих пород, что обеспечивает продолжительное пребывание запасенного углерода в экосистемах [Щепаченко и др., 2008].

Российская Федерация обладает почти четвертью всех лесов планеты и большей частью бореальных лесов [Сухих, 1998; Коровин, 2005]. По оценке Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, из 500 млрд т углерода наземной биомассы Земли вклад российских лесов составляет 34 млрд т [Кокорин, 2005]. Запасы С в фитомассе лесной растительности, по различным оценкам, равны 28,0–39,8 млрд т [Коровин, 2005]. Ежегодное депонирование углерода в фитомассе лесов России (GPP) на 2003 г. оценивается в 0,25 млрд т/год, а нетто-поглощение (NPP) достигает 0,04–

0,12 млрд т/год, что составляет 5–15 % от мировых значений [Sohngen et al., 2005]. Таким образом, леса России в масштабах биосферы являются важным хранилищем связанного органического углерода.

2.4. Лесная политика в рамках Киотского протокола

По мнению специалистов, углеродный потенциал лесов России необходимо реализовывать через механизмы Киотского протокола [Кокорин, 2004].

Основной сферой деятельности, регулируемой Киотским протоколом, являются промышленные эмиссии парниковых газов, но касается он также изменений источников и стоков парниковых газов в лесном секторе, представляющих прямой результат деятельности человека [Замолотчиков, 2005].

Согласно Киотскому протоколу, страны могут увеличивать стоки углерода различными путями, в том числе используя биологические источники, в частности, создавая новые леса (статья 3.3 – лесоразведение и лесовосстановление против обезлесивания) или внедряя более совершенные методы ведения лесного хозяйства (статья 3.4 – дополнительные мероприятия). Протокол превращает дополнительно накопленный углерод (вследствие снижения эмиссий путем технологических усовершенствований или определенных мероприятий в лесоводстве и сельском хозяйстве) в рыночный товар, он может стать предметом торговли между развитыми странами. Для обмена и продажи могут использоваться дополнительные секвестры углерода, которые будут формироваться в результате реализации совместных проектов между развитыми и развивающимися странами [Вашук, Швиденко, 2006].

Наиболее перспективными видами лесохозяйственной деятельности, обеспечивающими увеличение стоков атмосферного углерода и аккумуляцию его в наземных экосистемах, являются лесовосстановление и лесоразведение. Под лесовосстановлением в данном случае понимается создание лесов на пустующих землях, пригодных и предназначенных для лесовыращивания, а под лесоразведением – создание лесов на землях иных категорий – сельскохозяйственных и других угодьях, землях обороны, промышленности и т. д.

Очевидным преимуществом проектов по лесовосстановлению и лесоразведению перед другими видами лесохозяйственной деятельности является наличие важных сопутствующих эффектов (сопряженных выгод), связанных с дополнительным производством древесины, увеличением занятости сельского населения и улучшением экологической ситуации в малолесных районах страны.

Потенциал поглощения углерода лесами применительно к различным временным периодам реализации таких проектов оценивается от 132 до 600 млн т/год. В интересах России, крупнейшей лесной державы, эффективнее использовать потенциал лесов по поглощению атмосферного углерода, базируясь на механизмах Киотского протокола [Коровин, 2005].

Для решения задач поглощения углерода лесами применительно к разным временным периодам и с учетом территориальных особенностей требу-

ется современный аппарат исследования, который включает геоинформационные технологии.

2.5. Геоинформационные системы как инструмент исследования экосистем регионального масштаба

Геоинформационные системы (ГИС) предназначены для сбора, хранения, обработки, анализа и отображения пространственно-временных данных, основой интеграции которых служит географическая информация [Зейлер, 1999; Медведев и др., 2002; Мазуркин, Фадеев, 2009; Гончаров, 2010].

Считается, что географические или пространственные данные составляют более половины объема всей информации, используемой организациями разного профиля, для которых необходим учет пространственного размещения объектов [Зейлер, 1999]. Поэтому в настоящее время геоинформационные системы – один из наиболее бурно развивающихся сегментов рынка высоких компьютерных технологий, в котором работает большое количество крупных фирм, таких как Google, NASA, Refrations Research, Intergraph, Grass Development Team (GRASS GIS), Microsoft, ESRI (ArcGIS), Autodesk, CalComp и др. Наиболее распространены в России ArcGIS компании ESRI и MapInfo Professional.

Особенностью ГИС является возможность объединения по географическому признаку любой разнородной информации и баз данных, способность совместно обрабатывать и анализировать эту разнородную информацию, наглядно представлять данные различного характера [ДеМерс, Майкл, 1999; Взаимодействие..., 2000; Хортонен, 2001; Шаши, Санжей, 2004; Берлянт, Жалковский, 2005; Ризаев и др., 2008; Гончаров, 2010; Дротиков и др., 2010]. Главное, что отличает географическую информационную систему, – возможность проведения географического анализа. Такой анализ позволяет сопоставить между собой разнообразную пространственно привязанную информацию и представить результаты в форме, удобной для восприятия [Цветков, 1998; Гохман, Андриянов, 2000].

Геоинформационные системы находят применение в решении научных и прикладных задач в области мониторинга экологических ситуаций, рационального использования природных ресурсов, инфраструктурного проектирования, городского и регионального планирования, принятия оперативных мер в условиях чрезвычайных ситуаций, обеспечения возможности принятия оптимальных управленческих решений на основе анализа пространственных данных [Вадюнина, Корчагина, 1986; ДеМерс, Майкл, 1999; Зейлер, 1999; Дротиков и др., 2010]. Таким образом, использование ГИС позволяет ускорить процедуру принятия решений и повысить ее эффективность, сэкономить значительные финансовые и временные ресурсы.

Геоинформационный анализ и картографические методы моделирования являются эффективными и мощными инструментами для анализа, систематизации, выявления связей и визуализации различных природных процессов, протекающих в экологических системах [Абалаков, Кузьмин, 1997; Замай, Якубайлик, 1998; Трифонова и др., 2005; Гостева, Ерунова, 2006].

В настоящее время ГИС-технологии широко используются в различных эколого-биологических исследованиях [Замолотчиков и др., 1997а; Горюнова, Илюхина, 2004; Журавлева, Сорокин, 2004; Фомин, Шавнин, 2004; Германова и др., 2006; Шиятов и др., 2006; Ермолаев, Мальцев, 2008; Пригоряну, Киселева, 2008; Мазуркин, Фадеев, 2009], при экологическом мониторинге [Григорьев, Зайцев, 2003; Квашина, 2004; Алексеев и др., 2006; Пузаченко, Черненькова, 2006; Розов и др., 2006; Подколзин и др., 2009; Петина, 2010], оценке состояния природных объектов [Молнар, Куракина, 2007; Орлова, Ковалева, 2007; Шпакова, 2007; Ротанова и др., 2009], при экологическом зонировании территории [Шегельман и др., 2007; Рогова и др., 2010; Amir, 2001], оценке техногенного воздействия на экосистемы и планировании природоохранных мероприятий [Титова, 2003; Шумахер, 2003; Васильев, Ковалевская, 2005; Татаринцов, 2005; Атнабаев и др., 2006; Бейчук и др., 2006; Гостева, Ерунова, 2006; Куракина и др., 2006; Полушина, 2007] и в других областях.

С использованием ГИС-технологий проводятся исследования продуктивности древостоев, депонирования углерода в различных экосистемах и прогноза территориального распределения хвойных при изменении климата [Замолотчиков и др., 1997а, 2007; Исаев, Коровин, 2003; Гитарский и др., 2006]. В связи с вышеизложенным представляется перспективным изучение с помощью геоинформационных систем фотосинтетического стока углерода в лесные экосистемы и влияния на него климатических факторов.

* * *

Анализ литературных источников показывает, что глобальные изменения климата проявляются в изменении среднегодовой температуры воздуха в приземном слое атмосферы по регионам планеты и по сезонам года. Основным стабилизирующим фактором состояния биосферы являются лесные экосистемы бореальной зоны, пулы и потоки углерода в которых существенно зависят от климатических факторов и видового состава древесной растительности.

Территория Иркутской области отличается особыми климатическими условиями, которые характеризуются высоким уровнем солнечной радиации, холодными зимами и дефицитом увлажнения в весенний и раннелетний периоды. На большей части территории здесь преобладают хвойные древостои, отличающиеся разной степенью устойчивости и биологической продуктивности. На юге области сосредоточены крупные промышленные центры, объекты тепло- и электроэнергетики, в результате деятельности которых в атмосферный воздух поступает существенная доля выбросов углекислого газа. В связи с этим необходимость исследования особенностей потоков углерода в хвойных древостоях данного региона, разработка основ территориального прогноза фотосинтетического стока углерода, объективная оценка кислородопroduцирующей и газопоглощающей функций лесов не вызывают сомнений.

3.1. Климат, растительный и почвенный покров региона

Район исследования – территория Иркутской области. Иркутская область расположена в центре азиатской части материка. Ее площадь составляет 767,9 тыс. км² (4,6 % территории России). По этому показателю она находится на шестом месте в стране. С севера на юг область протянулась почти на 1450 км, с запада на восток – на 1318 км. Общая протяженность границ превышает 7240 км, в том числе по оз. Байкал – 520 км. Крайняя южная точка области располагается на 51° с.ш., северная оконечность почти достигает 65-й параллели [Государственный доклад..., 2011].

Область граничит на западе с Красноярским краем и Республикой Тыва, на северо-западе с Эвенкийским автономным округом, на северо-востоке с Республикой Саха (Якутия), на востоке с Забайкальским краем, на юго-востоке и юге с Республикой Бурятия.

В административно-территориальном отношении область, включая Усть-Ордынский Бурятский автономный округ, разделена на 33 района. В ее границах расположены 22 города, 55 поселков городского типа, 1503 населенных пункта в сельской местности. Численность населения на 01.01.2004 г. составляла 2560,9 тыс. человек, из них городское – 2030,7 и сельское – 530,2 тыс. человек [Ващук, Швиденко, 2006].

По климатическим условиям территория области выделяется среди других регионов страны, лежащих в тех же широтах, но находящихся в Европейской России или на Дальнем Востоке [Государственный доклад..., 2011]. Климат Иркутской области, как и всей территории Восточной Сибири, формируется под влиянием значительного притока солнечной энергии на деятельную поверхность и четко выраженной сезонной смены условий циркуляции атмосферы [Атлас..., 2004]. Удаленность от морей и расположение в центре материка придают климату резко континентальный характер с суровой, продолжительной малоснежной зимой и теплым летом с обильными кратковременными осадками [Государственный доклад..., 2011].

Максимальные годовые перепады температур воздуха могут превышать 80 °С, а суточные – 30 °С [Ващук, Швиденко, 2006]. Абсолютные максимальные температуры могут достигать 35–40 °С на основной территории и 30–33 °С на побережье оз. Байкал. Наиболее низкие температуры могут колебаться от –50 °С на юге до –60 °С на севере области, от –40 °С по южному побережью Байкала до –51 °С на северо-востоке озера [Государственный доклад..., 2011]. Среднегодовая температура воздуха почти на всей территории Иркутской области отрицательная (в Иркутске –1 °С, в Братске –2 °С, в Бодайбо –6 °С, в Катангском районе –9 °С) [Ващук, Швиденко, 2006].

На распределение осадков кроме атмосферной циркуляции оказывает влияние рельеф местности. Максимум осадков приходится на июль–август, минимум – на февраль–март. В южной части области из общего количества осадков на весну приходится 13 %, лето – 56 %, осень – 21 % и зиму – 10 %. На равнинной территории в среднем за год выпадает 350–380 мм осадков, в горах – 600 мм и более. Наибольшее количество осадков отмечается в горах Восточного Саяна, Хамар-Дабана и Северо-Байкальского нагорья (свыше 1000 мм), наименьшее – на острове Ольхон (около 100 мм) [Винокуров, Суходолов, 1998; Ващук, Швиденко, 2006].

В зимнее время над территорией области наблюдается большая повторяемость штилей (на основной части территории 30–70 %, в Тайшетском и южных районах – 10–35 %), способствующих формированию застойных явлений, которые значительно ухудшают способность атмосферы к самоочищению (туманы). Наиболее часто они происходят в поймах рек Ангара и Лена (60–85 дней в году). В долинах рек Киренга, Нижняя Тунгуска и Витим отмечается 40–65, в горных долинах – 20–30 дней с туманом [Государственный доклад..., 2011].

Продолжительность вегетационного периода колеблется от 70 дней в высокогорьях до 130 дней на Иркутско-Черемховской равнине. Начало вегетации растительности связано с переходом среднесуточных температур воздуха через отметку +5 °С. В это время распускается листва на березах, но по ночам на поверхности почвы еще возможны заморозки. Снежный покров разрушен. В отдельные годы снег может падать на распутившуюся листву, вызывая снеголомы. Сроки начала вегетации, которая происходит через одну-две недели после схода снежного покрова, растянуты с 15 мая в южных степных районах области до 20 июня в высокогорных местностях [Ващук, Швиденко, 2006].

Фенологический рубеж конца вегетации растительности совпадает с отмиранием трав, листвы на деревьях и кустарниках, появлением на поверхности почвы инея. В это время нередко выпадает первый снег, который обычно тает за один-два дня.

Неблагоприятно сказываются на развитии лесной растительности такие погодные явления весеннего сезона, как периодические возвраты холодов, сопровождающиеся обычно интенсивными заморозками, а также засухливость весны и начала лета. Относительная влажность воздуха в это время года достигает минимальных значений. Сочетание высоких дневных температур воздуха, сильных ветров, нередко сопровождающихся пыльными бурями, вызывает физиологическую сухость почвы, что препятствует естественному возобновлению леса на южных склонах. Активное иссушение почвы и отмершего напочвенного покрова обуславливает высокую пожарную опасность, способствует массовому возникновению и распространению лесных пожаров [Ващук, Швиденко, 2006].

Одной из особенностей климата области является большая продолжительность солнечного сияния, которая колеблется в зависимости от района от 1700 до 2500 ч в год.

Небольшие площади многолетней мерзлоты сосредоточены в северных и северо-восточных районах. Отдельные участки вечномерзлых грунтов на различной глубине в виде островов можно встретить и в южных районах [Винокуров, Суходолов, 1998; Ващук, Швиденко, 2006].

В современном растительном покрове Иркутской области преобладают равнинные и горные леса таежного типа, а также связанные с ними флористически, генетически и динамически лугово-кустарниковые и болотные ассоциации. По природному составу это в основном полидоминантные леса. Горно-таежные леса развиты на склонах горных хребтов Южно-Сибирской и Байкало-Джугджурской биогеографических областей, равнинные таежные леса более характерны для Среднесибирской области.

В настоящее время на территории области преобладают светлохвойные и сосновые леса. Темнохвойные леса из ели, кедра и пихты занимают относительно небольшие площади, хотя в недалеком прошлом они были распространены в регионе значительно шире [Атлас..., 2004].

По состоянию на 01.01.2013 г. общая площадь лесных пространств области составила 71,5 млн га, или 92 % ее территории. Покрытые лесной растительностью земли занимают 90 % общей площади лесных пространств [ЕМИСС..., 2013а-в]. Они представлены древостоями с преобладанием основных лесообразующих пород (58,9 млн га, или 93,6 %) и кустарниковыми зарослями (4,0 млн га, или 6,4 %). Так называемые прочие древесные породы занимают всего 0,8 тыс. га. Среди кустарников наибольшая площадь приходится на заросли кедрового стланика (2,4 млн га) и берез кустарниковых, или ерников (1,5 млн га). Доля покрытых лесной растительностью земель Иркутской области в общегосударственном балансе равна 8,1 %. Она значительна даже в масштабах земного шара – 1,6 % [Ващук, Швиденко, 2006].

География породного состава лесов области отличается крайней неравномерностью, что в значительной мере отражается на характере размещения лесной промышленности и деревообрабатывающих производств. В центральной части области преобладают сосново-лиственничные леса с примесью березы. На юге, в горах Восточного Саяна, доминируют кедровые леса. На севере и северо-востоке наиболее распространены древостои с преобладанием лиственницы.

Хвойные формации (с учетом пихты и кедра) занимают 47,4 млн га, или 80,5 % общей площади лесов, что свидетельствует об их высокой ценности [Ващук, Швиденко, 2006]. За последние десятилетия наблюдается прогрессирующее сокращение площади лесов в районах с высокой плотностью населения за счет передачи части земель под промышленное и жилищное строительство, сельскохозяйственное производство, садоводство и огородничество [Атлас..., 2004].

Территория, на которой проводились исследования фотосинтетической продуктивности хвойных, в географическом отношении представляет собой часть Среднесибирского плоскогорья – возвышенной равнины с преобладанием на ней более или менее пологих склонов. По лесорастительным условиям это Среднесибирская плоскогорная лесорастительная область, в

пределах которой район исследований расположен на стыке трех лесорастительных субобластей: Приангарского округа (пояс южно-таежных и подтаежных светлохвойных лесов), Верхнеангарской (пояс лесостепи) и Верхнеленской (пояс подтаежных светлохвойных лесов и пояс горно-таежный кедровый) лесорастительных провинций [Растительность..., 1983].

Почвенный покров области весьма разнообразен. В лесной зоне на песчаных и супесчаных грунтах широко распространены подзолистые почвы. Дерново-подзолистые почвы развиваются под пологом хвойных лесов, характеризуются низким естественным плодородием и, соответственно, мало используются в сельском хозяйстве [Государственный доклад..., 2001; Ващук, Швиденко, 2006]. Дерновые лесные почвы занимают нижние части склонов южной экспозиции с господством хвойно-лиственных лесных формаций, представленных в основном разнотравной группой типов леса. Дерново-карбонатные почвы формируются на известняках и известковых песчаниках и отличаются высоким плодородием [Ващук, Швиденко, 2006]. Они преобладают в земельном покрове Усть-Ордынского Бурятского округа, Братского, Качугского и Усть-Удинского районов [Государственный доклад..., 2001].

В лесостепной зоне распространены серые лесные почвы, которые входят под разреженными смешанными лесами с травянистым покровом [Ващук, Швиденко, 2006]. Для степных и лесостепных районов характерны выщелоченные черноземы – высокоплодородные почвы с высоким содержанием гумуса и мощным перегнойным горизонтом. Серые лесные почвы расположены в пределах наиболее освоенной территории области, главным образом в Иркутском, Усольском, Черемховском, Заларинском, Зиминском, Тулунском, Куйтунском, Нижнеудинском и Тайшетском районах [Государственный доклад..., 2001].

Самые продуктивные в сельскохозяйственном отношении почвы располагаются на юге Иркутской области. Содержание гумуса в этих почвах может достигать 9–11 %, хотя в среднем по Иркутской области оно не превышает 5 % [Винокуров, Суходолов, 1998; Колесниченко, 2004].

В целом почвы на большей части области благодаря своим качествам (глубина развития, механический состав, степень увлажнения, слабый подзолообразовательный процесс, содержание гумуса и минеральных веществ) достаточно плодородны и позволяют выращивать довольно производительные леса [Ващук, Швиденко, 2006].

3.2. Хвойные древостои Иркутской области

На территории Иркутской области доминируют хвойные древостои, сформированные с участием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.).

Сосна обыкновенная является одной из самых распространенных пород в Северной Евразии и имеет наибольшую экологическую амплитуду [Усольцев, 2001]. В европейской и азиатской частях Российской Федерации насаждения, в которых преобладает сосна, занимают более 100 млн га [Ващук и

др., 1997]. Сосна отличается светолюбием, быстрым ростом, приспособленностью к бедности почвы и недостатку влаги [Шиманюк, 1957, 1962; Попов, 1982; Ващук, Швиденко, 2006]. Однако в условиях Сибири корневая система сосны достаточно теплолюбива. Полагают [Попов, 1982], что именно с этим связана ограниченность распространения сосны в северных районах азиатской части России.

Среднесибирский регион является центром концентрации сосновых лесов: более трети площади лесов здесь занято сосняками. Южную тайгу Средней Сибири нередко выделяют в отдельную область распространения сосновых лесов: они занимают более 58 % лесопокрытой площади. Концентрированное размещение здесь сосновых лесов объясняется сухостью климата и частыми лесными пожарами – сосна как ксерофильная и быстроразмножающаяся порода успешно противостоит воздействию этих факторов. По мнению Л.В. Попова [1982], высокий уровень инсоляции в Средней Сибири определяет доминирование светолюбивой сосны в растительных сообществах.

На долю сосновых лесов Иркутского региона приходится 14,1 % общей площади сосняков России. Сосновые боры занимают 16,6 млн га, или 28,1 % покрытых лесом земель области. Благодаря уникальным физиологическим свойствам (засухоустойчивость, неприхотливость к почвенно-грунтовым условиям), сосна представлена во всех лесорастительных зонах и административных районах области [Ващук, Швиденко, 2006].

Ель сибирская обладает широкой экологической амплитудой, выносит низкую температуру в северных и восточных районах, но в сухом климате становится менее конкурентоспособной и замещается другими видами [Правдин, 1975]. В Восточной Сибири *Picea obovata* Ledeb. избегает крайностей почвенного увлажнения [Попов, 1982]. Отношение ели сибирской к свету существенно изменяется с возрастом, в Предбайкалье она по теневыносливости сильно уступает не только пихте, но и кедру [Попов, 1961].

В южной тайге Восточной Сибири ель сибирская широко распространена в качестве сопутствующей породы, значительно реже она выступает основным лесообразователем. Леса с преобладанием ели занимают здесь только 7,8 % лесопокрытой площади. Это в основном долинные леса и небольшие массивы в верховьях рек [Попов, 1982]. В Иркутской области еловые леса занимают четвертое место среди хвойных древостоев (3,44 млн га, или 5,8 %). Здесь ель расселяется главным образом вдоль рек и ручьев и является преобладающей породой. Часто растет совместно с другими темнохвойными породами в виде примеси или второго яруса [Ващук, Швиденко, 2006].

Лиственница сибирская – крупное долговечное дерево, которое растет в высоту до глубокой старости [Тихомиров и др., 1961; Уткин, 1965; Яковлев, Фалалеев, 1982]. В Восточной Сибири деревья лиственницы возрастом 600–700 лет не редкость [Попов, 1982]. В спелом возрасте у деревьев в комлевой части очень толстая кора (занимающая 23–27 % всего объема ствола), которая хорошо защищает от низовых пожаров [Черников, 1951; Уткин, Исаев, 1962; Фуряев, 1977]. Листопадность позволяет лиственнице переносить экстремально низкие температуры, а также летнее и зимнее обезвоживание

[Дадыкин, 1960; Степанов, 1988; Тарабукина, Саввинов, 1990]. Эта порода менее ксерофильна по сравнению с сосной [Коропачинский, 1983; Нестерович и др., 1986], в условиях севера Сибири способна переносить застойное переувлажнение, нередко образуя низкопродуктивные редколесья по болотам [Поварницын, 1941]. В молодом возрасте она может выносить значительное затенение, произрастая под пологом древостоев, в зрелом возрасте отличается наибольшим из всех древесных пород светолюбием [Тихомиров и др., 1961; Попов, 1982; Коропачинский, 1983]. В расчете на массу хвои лиственница обладает способностью интенсивнее всех древесных пород усваивать в процессе фотосинтеза углекислоту. Благодаря разреженной, хорошо освещенной кроне лиственница более эффективно ассимилирует CO_2 , т. е. при меньшей массе хвои может обеспечить сопоставимый уровень поглощения углерода по сравнению с вечнозелеными хвойными [Щепаченко и др., 2008].

В Иркутской области древостои с преобладанием *Larix sibirica* Ledeb. занимают не менее трети лесопокрытой площади. Лиственница сибирская распространена в западных и центральных районах области. Она имеет наиболее благоприятные лесорастительные условия: долины рек на хорошо прогреваемых, богатых и достаточно увлажненных почвах [Ващук, Швиденко, 2006].

3.3. Исследования фотосинтетической активности хвойных деревьев

Исследования углекислотного газообмена сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) проводили в насаждении, заложенном на окраине Иркутска ($52^{\circ}14'21''$ с.ш., $104^{\circ}16'7''$ в.д.) в 1985 г. Насаждение расположено на пологом склоне ($2-3^{\circ}$) восточной экспозиции. Описание почвенного разреза на экспериментальном участке выполнено канд. биол. наук В.Т. Колесниченко (СИФИБР СО РАН). По описанию почва здесь серая лесная неоподзоленная суглинистая, на юрских углистых суглинках, подстилаемых песком. Грунтовые воды залегают на значительной глубине (11–50 м) и не оказывают заметного влияния на режим влажности почв.

Насаждение сформировано рядами: в первом и четвертом рядах расположены деревья сосны, во втором и третьем рядах – поочередно ели и лиственницы. Расстояние при посадке между рядами 2 м, в рядах между деревьями – 1,5 м.

До 1995 г. экспериментальные исследования сотрудниками лаборатории экологии фотосинтеза СИФИБР СО РАН в течение десятилетия проводились на стационаре, расположенном в лесостепном районе Предбайкалья, в естественном лесном насаждении I класса возраста. Одновременно исследовались составляющие углекислотного газообмена (истинный фотосинтез, нетто-фотосинтез, световое и темновое дыхание хвои) на деревьях из насаждения I класса возраста, расположенного на окраине г. Иркутска [Щербатюк и др., 1991]. Сопоставление значений фотосинтетической активности хвойных в этих экспериментальных точках показало идентичность их реакции на воздействие природных факторов. Это позволило сделать вывод о

возможности распространения результатов исследований на естественные лесные насаждения юга Восточной Сибири [Суворова, 2006].

Экспериментальные определения фотосинтетической активности сосны обыкновенной, ели сибирской и лиственницы сибирской начинали с момента появления первых признаков положительного газообмена хвои ранней весной (первые числа апреля) и заканчивали с завершением фотосинтетического процесса (в первой декаде ноября). Наблюдения продолжались круглосуточно в течение трех дней каждой недели. В опытах использовали по три дерева каждого вида.

Поглощение углекислого газа охвоенными побегами регистрировали многоканальной установкой [Щербатюк, 1990], смонтированной на основе ИК-газоанализатора Infracal-4 (фирмы "Junkolor", Германия). В экспериментах использовали цилиндрические полиэтиленовые ассимиляционные камеры с каркасами из алюминиевой проволоки. На верхнем и нижнем концах камеры располагали входной и выходной штуцеры. Воздух проникал в камеру через входной штуцер, омывал хвою и через выходной штуцер по полиэтиленовым шлангам поступал на анализ. Свободные "рукава" камеры герметично фиксировали на побеге полосками эластичного бинта и изоляционной лентой.

Камеры устанавливали в средней части крон с южной стороны. Использовались побеги с хвоей второго (прошлого) года жизни. Количество хвои в каждой ассимиляционной камере подбиралось с учетом методических подходов, разработанных ранее [Щербатюк и др., 1991]. При помощи автоматического переключателя CO_2 -газообмен определялся последовательно в каждой из девяти ассимиляционных камер и в нескольких каналах, установленных для определения фоновых концентраций CO_2 . Результаты анализа непрерывно регистрировались потенциометром ЭПП-09. Ошибка показаний прибора Infracal-4 составляла 10 % [Киприн, 1972].

Параллельно с исследованиями углекислотного газообмена проводили наблюдения за факторами среды – температурами воздуха и почвы, солнечной радиацией и влажностью воздуха, описывали погодные условия дня, измеряли количество осадков, определяли запасы влаги в почве. Температуру в ассимиляционных камерах и температуру наружного воздуха измеряли медными термодатчиками и регистрировали 12-точечным регистратором КСМ-4 (Россия). Влажность воздуха устанавливали с помощью недельного гигрографа с ежедневной проверкой его показаний по психрометру Ассмана. Интенсивность радиации над пологом измеряли пиранометром Янишевского с регистрацией показаний потенциометром КСП-4 (Россия). Температуру почвы на глубине 5, 10, 15, 20 см измеряли термометрами Савинова. Запасы доступной почвенной влаги определяли термостатно-весовым методом, отбирая пробы ежедекадно через 10 см в верхнем 50-сантиметровом слое почвы [Федоровский, 1975]. Ошибка определения факторов среды (температура, освещенность, запас почвенной влаги) метеорологическими приборами не превышала допустимых паспортных значений.

При определении экспериментальных значений фотосинтетической активности показания CO_2 в ассимиляционных камерах и фоновых концент-

раций CO_2 снимали с лент регистратора ЭПП с помощью шкалы в 0–500 ppm. Значения видимого фотосинтеза за каждый час дня рассчитывали для светового периода всех суток [Лонг, Холлгрэн, 1989], в течение которых проводились наблюдения. В разные годы общая продолжительность наблюдений фотосинтеза колебалась от 67 до 81 суток.

Дневную фотосинтетическую продуктивность определяли как сумму всех часовых значений видимого фотосинтеза. Фотосинтетическую продуктивность хвой за месяц рассчитывали как произведение среднедневной фотосинтетической продуктивности, определяемой по числу экспериментальных дней, на количество дней в месяце. Сезонную (годовую) продуктивность фотосинтеза определяли как сумму продуктивности фотосинтеза за все месяцы вегетации.

Регрессионный анализ зависимости дневной продуктивности фотосинтеза от факторов среды проведен с использованием компьютерной программы Microsoft Excel 7.0.

При расчете фотосинтетической продуктивности для территории Иркутской области использовали данные о распределении древостоев каждого вида по четырем группам возраста (молодые – 10–20 лет, средняя высота 6–8 м; средневозрастные – 30–40 лет, средняя высота 12 м; приспевающие – 100–120 лет, средняя высота 18 м; в сумме спелые и перестойные – старше 180 лет, средняя высота 20–24 м) и об изменении интенсивности фотосинтеза в зависимости от возраста дерева [Суворова, 1992; Ващук и др., 1997] (табл. 1). Массу хвой на гектар рассчитывали по Н.И. Казимирову с учетом коэффициентов определения свежей зелени и ее перевода в сухой вес: 0,78 и 0,48 для сосны, 0,60 и 0,46 для ели, 0,56 и 0,43 для лиственницы [Грошев и др., 1980].

По удельным (на единицу массы) значениям годичной фотосинтетической продуктивности деревьев каждой возрастной группы рассчитывали продуктивность фотосинтеза древостоя на занимаемую территорию по формуле [Форма..., 2011]

$$GPP_R = Ph_V S_R M,$$

где GPP_R – продуктивность фотосинтеза CO_2 древостоя данной возрастной группы на территории района, т; Ph_V – годичная продуктивность фотосинтеза CO_2 единицы массы хвой, г/(г сух. м.год); S_R – площадь территории древостоя данной возрастной группы, га; M – сухая масса (сух. м.) хвой на 1 га, т. Аналогичным образом рассчитывали продуктивность фотосинтеза древо-

Таблица 1

**Коэффициент перевода значений фотосинтеза древостоев
в зависимости от возраста**

Древостои	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные
Сосна	1,00	0,98	0,59	0,65
Ель	1,00	1,12	0,68	0,70
Лиственница	1,00	1,42	0,65	0,42

стоя (брутто-продукцию) каждого вида отдельной возрастной группы для каждого административного района. Общую по области фотосинтетическую продуктивность вычисляли как сумму GPP сосновых, еловых и лиственничных древостоев четырех групп возраста по всем административным районам. Нетто-продукцию древостоя отдельной возрастной группы каждого вида рассчитывали по общепринятой методике с учетом $NPP = 0,5GPP$ [Кудеяров и др., 2007].

Количество кислорода, выделяемого хвойными древостоями, было рассчитано по общему уравнению фотосинтеза с использованием данных о фотосинтетической продуктивности хвои. Обеспеченность кислородом населения административных районов Иркутской области была определена с учетом экспериментальных данных [Чарный, 1961], согласно которым человек в покое при минимальном газообмене потребляет около 250 мл кислорода в минуту. При тяжелой мышечной работе потребление кислорода увеличивается в 10 раз и более, что составляет примерно 2500–3000 мл/мин. Это положение подтверждается данными, полученными при изучении потребления кислорода отдельными органами тела человека в покое и при напряженной деятельности.

Расчет валовых выбросов углекислого газа предприятиями теплоэнергетики Иркутской области проводили в соответствии с методическими указаниями, разработанными ОАО “Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС” и ОАО “Энергетический институт им. Г.М. Крижановского” и утвержденными Департаментом научно-технической политики и развития РАО “ЕЭС России” от 17.02.2001 г. [Методические указания..., 2001].

Валовый выброс диоксида углерода M_{CO_2} [т] при сжигании твердого (кроме сланцев) и жидкого топлива рассчитывался по формуле

$$M_{CO_2} = 0,01B_{\text{нат}} \cdot 3,664 C^p (1 - 0,01q_4),$$

где $B_{\text{нат}}$ – расход натурального твердого или жидкого топлива за отчетный период, т; C^p – содержание углерода в топливе на рабочую массу, %; q_4 – потери тепла вследствие механической неполноты сгорания твердого и жидкого топлива, %.

Содержание углерода в топливе на рабочую массу принято по [Тепловой расчет..., 1973], потери тепла вследствие механической неполноты сгорания твердого и жидкого топлива приняты по [Методика..., 1999].

Пересчет валового выброса CO_2 при сжигании древесного топлива из объемных единиц (m^3) в весовые выполнен с использованием следующих коэффициентов: коэффициент пересчета в плотные кубические метры – 0,75; коэффициент пересчета из плотных кубических метров в тонны натурального топлива – 0,67 [Указания..., 2009а].

Для расчета валового выброса диоксида углерода при сжигании газообразного топлива использовали коэффициент эмиссии в расчете на 1 т сжигаемого условного топлива, равный 1,62 [Национальный доклад..., 2010]. При переводе из натурального топлива в условное применяли средний калорийный эквивалент, который для горючего природного (естественного) газа равен 1,154 [Указания..., 2009б].

Для оценки способности хвойных древостоев ассимилировать в процессе фотосинтеза CO_2 антропогенного происхождения был разработан коэффициент эффективности газопоглотительной (CO_2 -поглотительной) активности лесов (КЭГАЛ). Коэффициент численно рассчитывается как отношение объема выбросов CO_2 от предприятий теплоэнергетики отдельного муниципального района к фотосинтетической продуктивности хвойных (в сумме сосновых, лиственничных и еловых) древостоев, произрастающих на его территории:

$$\text{КЭГАЛ} = M_1/M_2,$$

где M_1 – объем выбросов CO_2 , т; M_2 – годовое поглощение CO_2 (GPP) хвойными древостоями в процессе фотосинтеза, т. Численное значение КЭГАЛ ниже 1 указывает на преобладание фотосинтетического поглощения CO_2 над выбросами углекислого газа и высокую газопоглотительную активность лесов, выше 1 – на низкую газопоглотительную активность лесов и высокий уровень техногенного CO_2 в атмосфере данного муниципального района.

При построении ГИС-картосхем брутто- и нетто-продукции, а также эффективности газопоглотительной активности хвойных древостоев Иркутской области использована компьютерная программа ArcView GIS 3.3.

Дневная фотосинтетическая продуктивность – показатель, характеризующий количество углекислого газа, поглощенного в процессе фотосинтеза за день [Вознесенский, 1977]. Следовательно, это показатель реального ежедневного вклада фотосинтеза в продукционный процесс растения. Дневная фотосинтетическая продуктивность изменяется в течение вегетации в зависимости от погодных условий. Основным фактором, лимитирующим процесс фотосинтеза в условиях юга Восточной Сибири, является запас влаги в почве [Щербатюк и др., 1991].

4.1. Погодные условия периодов наблюдений

Показатели погодных условий внешней среды в 2003 и 2008–2010 гг. представлены на рис. 2.

Вегетационный период 2003 г. был засушливым – количество выпавших осадков с апреля по конец июля составило 57 мм при среднемноголетней норме 118 мм. Среднемесячные температуры воздуха апреля, мая, июня и последующего периода превысили многолетнюю норму на 1,5–3,0 °С.

Усиление летней засухи было предотвращено выпадением в июле и августе осадков до 309 мм при среднемноголетней норме 177 мм. С начала вегетации и до выпадения обильных осадков было зафиксировано большое количество лесных пожаров, что, очевидно, привело к снижению месячной суммарной солнечной радиации относительно среднемноголетней нормы.

Для вегетационного периода 2008 г. отмечено превышение среднемноголетних значений температуры воздуха и количества осадков в весенний и летний периоды. За май, июнь и июль выпало 330 мм осадков при среднемноголетней норме 194 мм. Температура воздуха в весенний, летний и осенний периоды вегетации превысила многолетние значения на 1,0–1,5 °С. В осенний период было зафиксировано превышение среднемноголетних значений температуры почвы на 1,0–3,5 °С.

Период вегетации 2009 г. был достаточно благоприятным по увлажнению и отличался холодными ливневыми дождями и умеренно низкими ночными температурами летнего периода. В весенний и осенний сезоны отмечено превышение количества осадков относительно среднемноголетних на 70 и 76 мм соответственно. Температура почвы в весенний и летний периоды была ниже многолетних значений на 2,5–4,0 °С. Однако в летний период уровень суммарной солнечной радиации был превышен на 100–130 МДж/м².

В весенний период 2010 г. отмечено превышение среднемноголетних значений суммарной солнечной радиации на 100 МДж/м² и осадков на 25 мм.

4. Изменение фотосинтетической продуктивности в зависимости от факторов

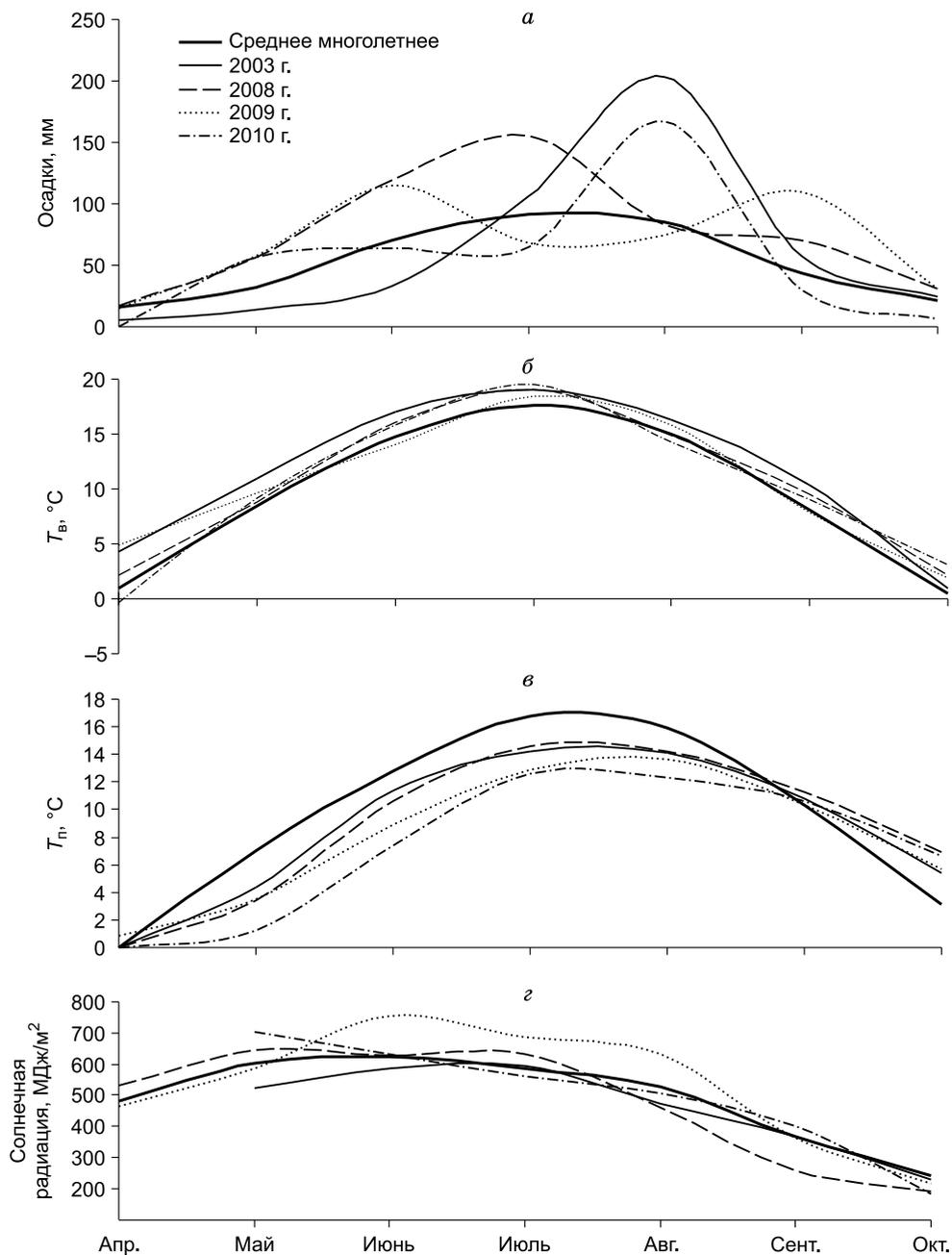


Рис. 2. Климатическая характеристика вегетационных периодов 2003, 2008–2010 гг. а – сумма осадков; б – среднемесячная температура воздуха ($T_{в}$); в – среднемесячная температура почвы ($T_{п}$); г – месячная суммарная солнечная радиация.

В течение вегетации зафиксировано варьирование температуры воздуха в пределах одного градуса, в июле и октябре – превышение многолетних значений на 2,0 и 2,5 °С соответственно. Июль характеризовался как засушливый месяц, поскольку количество выпавших осадков составило 65 мм при норме 92 мм. Однако уже в августе количество осадков превысило средние значения почти в два раза. Температура почвы в весенний и летний периоды оказалась ниже нормы на 6 и 4 °С соответственно, в октябре почва прогрелась до 6,6 °С, что превысило среднемноголетние значения на 3,2 °С.

В целом можно сделать вывод, что в вегетационный период 2003 г. отмечался дефицит влажности и высокие значения температуры воздуха, обеспечившие экстремальные условия вегетации. Вегетационные периоды 2008–2010 гг. сопоставимы со среднемноголетними данными, и их можно охарактеризовать как благоприятные по уровню влаго- и теплообеспеченности.

4.2. Фотосинтетическая продуктивность сосны, ели и лиственницы при экстремальном и оптимальном почвенном увлажнении

Изучение особенностей фотосинтетической деятельности хвойных проводилось нами на деревьях трех видов – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). Выше отмечалось, что эти виды различаются по своим биологическим свойствам – отношению к свету, особенностям регуляции водного режима. Сосна и лиственница светолюбивы, но различаются требовательностью к почвенному увлажнению. Сосна – ксерофит, лиственница же, как и теневыносливая ель, мезофит, но в отличие от нее способна произрастать вместе с сосной в лесостепи и подниматься до высоких широт лесотундры.

В районе проведения исследований устойчивая фотосинтетическая активность хвойных начинается со второй половины – конца апреля и прекращается в конце октября. Поскольку воздействие факторов среды на фотосинтез в течение вегетации изменяется неравномерно, весь вегетационный период нами был разделен на четыре сезона: ранневесенний (апрель–первая половина мая), весенний (вторая половина мая–начало июня), летний (вторая половина июня–август) и осенний (сентябрь–октябрь) [Суворова, 2009].

Общая продолжительность видимого фотосинтеза этих пород в среднем составляет 180–200 суток. У лиственницы фотосинтетическая активность начинается со второй половины мая и завершается в конце сентября, т. е. продолжительность ее фотосинтетической активности на 1,5–2 месяца короче, чем у сосны и ели. Но эта порода отличается наиболее высокой удельной продуктивностью фотосинтеза – в 2,8–3,9 раза выше по сравнению с сосной и в 3,2–4,9 раза выше, чем у ели (рис. 3). Это соответствует более ранним исследованиям ученых, в частности, для территории Предбайкалья фотосинтетическая продуктивность лиственницы составляет 11,0 г CO₂ на 1 г сухой массы хвои в год, что в 2,7 и 3,9 раза выше, чем у сосны и ели [Щербатюк и др., 1991].

Проведенные нами исследования вегетационных изменений фотосинтетической продуктивности хвои сосны, ели и лиственницы в 2008–2010 гг. показали незначительное варьирование данного показателя по годам (см.

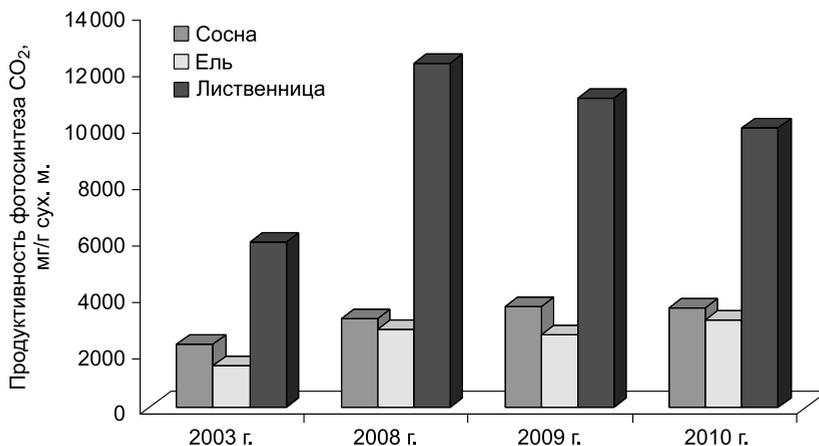


Рис. 3. Годичная фотосинтетическая продуктивность хвойных в 2003, 2008–2010 гг.

рис. 3), поскольку гидротермические условия этих лет были благоприятными по количеству осадков и теплообеспеченности. Поэтому для исследования динамики фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев в условиях почвенной засухи из базы данных (1995–2010 гг.) был выбран 2003 год, который характеризовался малым количеством выпавших осадков за летний период и высокими среднемесячными температурами воздуха. Для сравнения с экстремальным годом из представленных благоприятных сезонов вегетации был выбран 2010 год.

На рис. 4 представлен характер изменения дневной фотосинтетической продуктивности хвойных параллельно с уровнем почвенной увлажненности в течение периодов вегетации 2003 и 2010 гг. Видно, что показатели продуктивности фотосинтеза и влажности почвы согласуются между собой для большинства периодов вегетации.

Как упоминалось ранее, в летний период 2003 г. отмечался дефицит влагообеспеченности. Запас доступной почвенной влаги в почвенном слое 0–50 см в летний период был близок к экстремальным значениям (30 мм), что негативно сказалось на фотосинтетической продуктивности хвойных. Усиление летней засухи было предотвращено выпадением в июле и августе осадков до 309 мм при среднемноголетней норме 177 мм, которые обеспечили существенное пополнение запасов влаги в почве, но не восстановили высокого уровня фотосинтетической активности хвойных во второй половине вегетации (см. рис. 4). В результате величина годового фотосинтетического поглощения CO_2 для сосны, ели и лиственницы в условиях засухи составила 2228,6, 1480,1 и 5868,5 мг/г сухой массы хвои соответственно.

В условиях более благоприятного почвенного увлажнения 2010 г. запас доступной почвенной влаги в верхнем 50-сантиметровом слое изменялся от 60 до 130 мм. В связи с этим величина фотосинтетического поглощения CO_2 в сравнении с 2003 г. возросла в 1,5–2 раза и составила для сосны 3518,2 мг/г, для ели – 3121,6 и лиственницы – 9959,3 мг/г сухой массы хвои (см. рис. 4). Меньшие амплитуды изменений этих показателей у сосны и

4. Изменение фотосинтетической продуктивности в зависимости от факторов

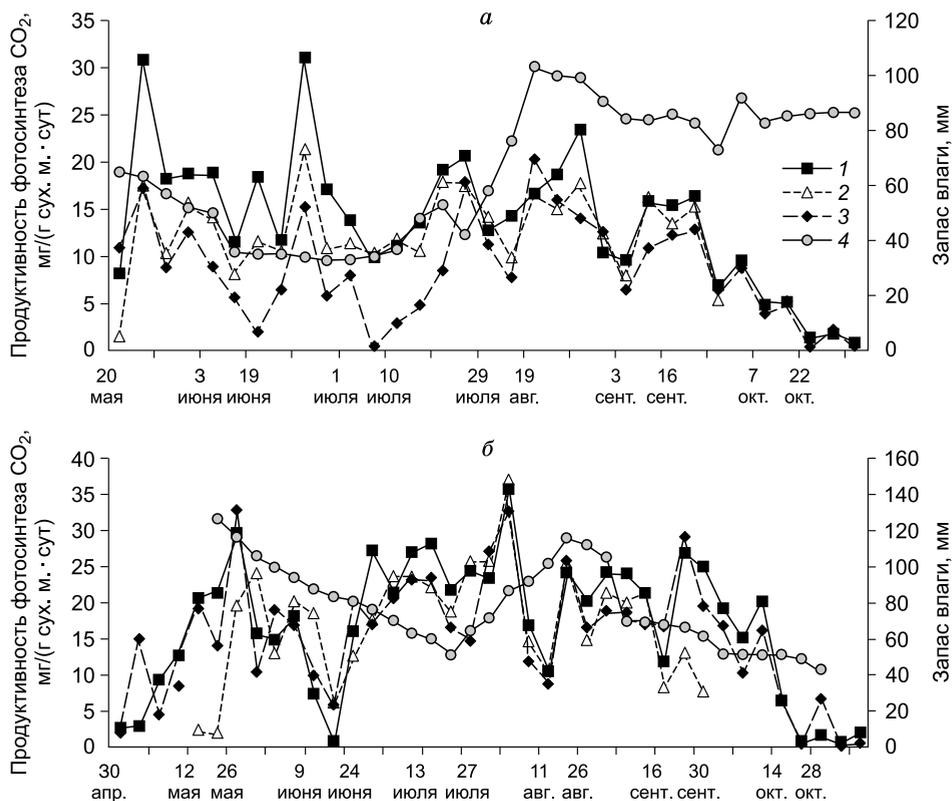


Рис. 4. Сезонный ход дневной продуктивности фотосинтеза сосны (линия 1), ели (2), лиственницы (3) и запаса доступной почвенной влаги верхнего (0–50 см) слоя почвы (линия 4) в 2003 г. (а), 2010 г. (б).

лиственницы по сравнению с елью говорят о более широкой экологической пластичности этих пород. В то же время высокая продуктивность фотосинтеза ели в благоприятный по увлажнению сезон свидетельствует о ее большей экологической специализации в связи с приспособленностью к более увлажненным местообитаниям.

Кроме запаса доступной почвенной влаги, изменения дневной продуктивности фотосинтеза хвойных в 2003, 2010 гг. сопоставлялись с изменениями суммарной за день освещенности, средневенной влажности воздуха, средневенной температуры воздуха и температуры почвы на глубине 5 см (в 13.00 часов). Установлено, что дневная продуктивность фотосинтеза хвои не имела выраженной зависимости от влажности и температуры воздуха. Реакция фотосинтеза на изменение других факторов среды различалась при разной увлажненности в период вегетации.

В условиях засухи 2003 г. отчетливо выражено изменение продуктивности фотосинтеза в осенний период (сентябрь–октябрь) у сосны в зависимости от температуры почвы и освещенности, у ели – от температуры почвы и у лиственницы – от освещенности (рис. 5).

4. Изменение фотосинтетической продуктивности в зависимости от факторов

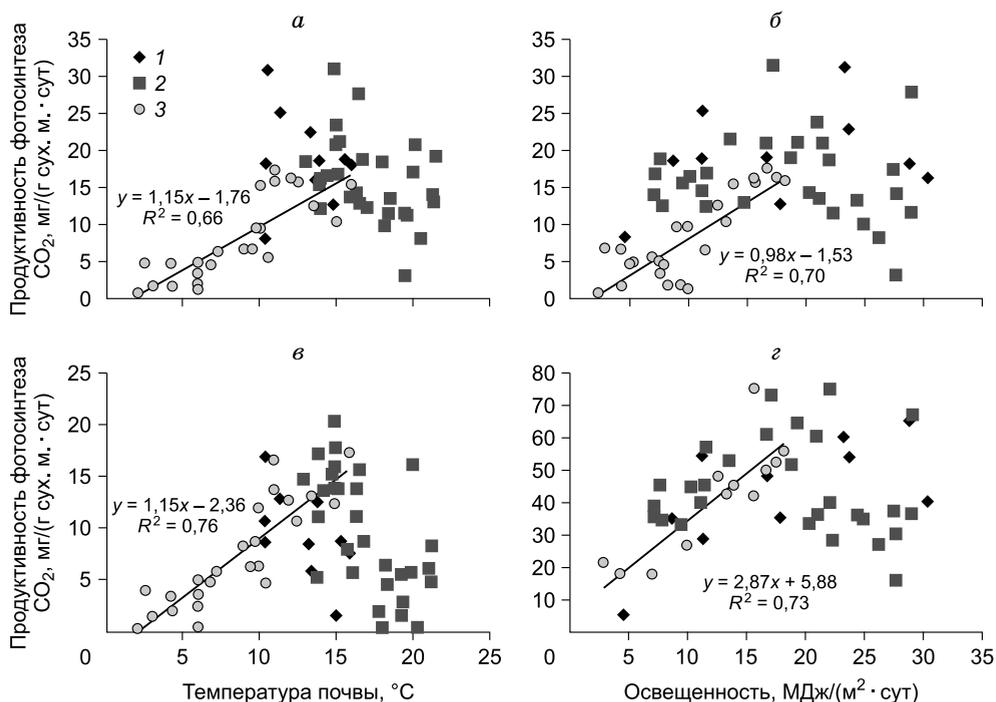


Рис. 5. Зависимость дневной фотосинтетической продуктивности сосны (а, б), ели (в) и лиственницы (г) от температуры почвы (глубина 5 см) и освещенности в 2003 г.

1 – весна; 2 – лето; 3 – осень.

По данным за сентябрь–октябрь 2003 г. (см. рис. 5), зависимость дневной продуктивности фотосинтеза от температуры почвы была самой высокой у ели (коэффициент детерминации $R^2 = 0,76$), затем у сосны ($R^2 = 0,66$) и наименьшей у лиственницы ($R^2 = 0,57$). За этот же период отмечена близкая зависимость фотосинтетической продуктивности от освещенности у сосны ($R^2 = 0,70$) и лиственницы ($R^2 = 0,73$).

В условиях благоприятного увлажнения 2010 г. проявлялось изменение продуктивности фотосинтеза от температуры почвы у сосны в ранневесенний (апрель–первая половина мая) и осенний периоды, у ели – в ранневесенний и у лиственницы – в весенний (вторая половина мая–начало июня) периоды (рис. 6).

В 2010 г. зависимость фотосинтетической продуктивности от температуры почвы в ранневесенний период у сосны (коэффициент детерминации $R^2 = 0,63$), ели ($R^2 = 0,66$), в весенний период у лиственницы ($R^2 = 0,63$) и в осенний период у сосны ($R^2 = 0,63$) была практически одинаковой (см. рис. 6). Таким образом, основным фактором, лимитирующим продуктивность фотосинтеза у хвойных, является влажность почвы, вторыми по значимости – температура почвы и освещенность, действие остальных факторов на фотосинтез незначительно.

4. Изменение фотосинтетической продуктивности в зависимости от факторов

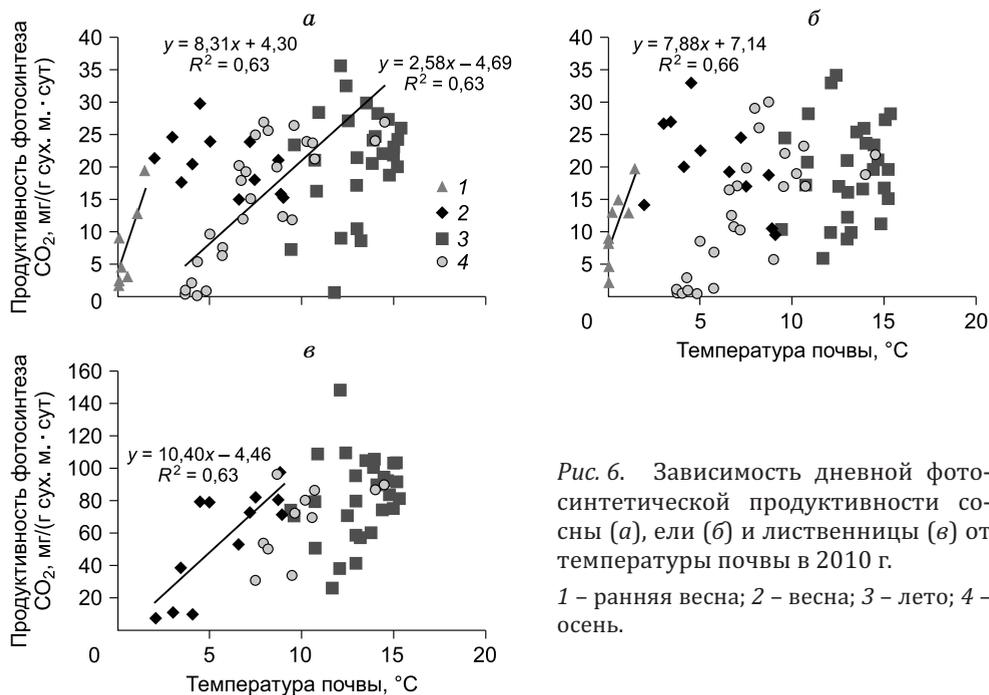


Рис. 6. Зависимость дневной фотосинтетической продуктивности сосны (а), ели (б) и лиственницы (в) от температуры почвы в 2010 г.

1 – ранняя весна; 2 – весна; 3 – лето; 4 – осень.

Ранее было показано, что реакция фотосинтетического аппарата растений на снижение атмосферной и почвенной влажности обусловлена работой устьичного аппарата и всасывающей силой корневой системы [Молдау, 1977; Коппель, 1981; Варлагин, Выгодская, 1993; Болондинский, 2004, 2008; Verpinger et al., 1996]. Водный стресс, возникающий в результате ограничения поступления воды через корни растений, приводит к снижению водного потенциала ксилемы ствола и побегов. Одновременно из корневой системы усиливается поступление абсцизовой кислоты, снижающей устьичную проводимость [Khalil, Grace, 1993].

В исследуемые периоды не наблюдалось выраженной зависимости дневной продуктивности фотосинтеза хвойных от влажности и температуры воздуха. В то же время отмечена высокая сопряженность фотосинтетической продуктивности хвойных с температурой почвы в ранневесенний и осенний периоды вегетации. Это связано с преобладанием в районе исследования длительно сезонномерзлотных почв, которые в зимний период промерзают до глубины 200 см, а медленное оттаивание их начинается после прогревания воздуха и верхних слоев почвы. Известно, что низкий уровень поступления воды, питательных веществ и гормонов из корневой системы, находящейся в холодной почве, лимитирует активность фотосинтетического аппарата [Дадыкин, 1952; Schwarz et al., 1997]. На юге Восточной Сибири в ранневесенний период у вечнозеленых хвойных происходят структурные перестройки мембран хлоропластов от зимнего типа к летнему, по мере восстановления структуры мембран хлоропластов развивается процесс фото-

синтеза [Оскорбина, 2010]. Осенью начинаются обратные адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата, связанные с переходом растений в состояние глубокого покоя, они индуцируются снижением уровня освещенности и температуры воздуха. Осеннее снижение фотосинтетической продуктивности, судя по литературным данным, обусловлено перестройкой светособирающих комплексов фотосинтетического аппарата [Чепалов, 2010] и снижением ферментативной активности под воздействием низких температур [Орт и др., 1987].

Для летнего периода установлено, что фотосинтетическая продуктивность определяется изменением запасов почвенной влаги. Как показали исследования на древесной и кустарниковой растительности, основным фактором, лимитирующим сезонный ход фотосинтеза, является водный стресс растения, развивающийся в результате почвенной засухи [Голомазова, 1978; Болондинский, 2010; Mohanty, Boyer, 1976; Dohrenbursch et al., 1999]. В летний период засухи высокие температуры воздуха вызывают температурную депрессию фотосинтеза. Воздействие высокой температуры приводит к снижению устьичной проводимости, которая, в свою очередь, уменьшает парциальное давление CO_2 внутри листа и изменяет растворимость CO_2 и O_2 , приводя к увеличению фотодыхания [Jordan, Ogren, 1984; Brooks, Farquhar, 1985; Pons, Welschen, 2003].

Ранее было установлено, что биологическую продуктивность и распределение лесов на территории Средней Сибири определяют такие факторы, как высокий уровень инсоляции, холодные почвы и недостаток почвенного увлажнения [Шиманюк, 1962; Побединский, 1965; Смирнов, 1969; Попов, 1982; Малышев, Пешкова, 1984]. Нами показано, что эти же факторы лимитируют фотосинтетическую продуктивность изучаемых хвойных деревьев. Отсюда следует, что оценка прироста биологической продукции (чистой первичной продукции), выполненная эколого-физиологическим методом на основе фотосинтетической продуктивности деревьев, позволяет получить адекватный результат.

Различия в природных условиях, местоположении, составе лесного фонда, транспортном тяготении, степени развития производственных сил, направлениях использования древесного сырья обусловили выделение на территории Иркутской области семи лесоэкономических районов: Катангский – традиционного природопользования (административный район Катангский), Прижелезнодорожный (Чунский, Тайшетский, Нижнеудинский, Тулунский, Куйтунский, Зиминский, Заларинский, Черемховский, Усольский, Иркутский, Балаганский, Ангарский, Шелеховский, Слюдянский, Ольхонский районы и часть Усть-Удинского района), Усть-Илимский (Усть-Илимский район, часть Нижнеилимского района), Верхнеленский (Киренский, Усть-Кутский, Казаченско-Ленский, Жигаловский, Качугский районы), Мамско-Бодайбинский (Мамско-Чуйский, Бодайбинский районы), Братский (Братский район, часть Нижнеилимского и часть Усть-Удинского районов), Усть-Ордынский Бурятский автономный округ (УОБ АО – Аларский, Боханский, Нукутский, Осинский, Эхирит-Булагатский, Баяндаевский районы) [Атлас..., 2004].

Лесные ресурсы по территории Иркутской области размещены крайне неравномерно (табл. 2). По состоянию на 01.01.2013 г. средняя лесистость по области составила 83,1 % [ЕМИСС..., 2013а]. Отклонение от этой цифры по административным районам велико – от 25,7 % (Нукутский район) до 95,5 % (Усть-Кутский район). Более половины (63 %) территории области имеет лесистость свыше 80 %, 13 % территории – от 70 до 80 %, 19 % территории – от 60 до 70 % и лишь 5 % – менее 60 %. В среднем на одного человека приходится 20,7 га лесов, а с учетом кустарниковых зарослей – 22 га, что в 4 раза больше, чем в среднем по Российской Федерации. По отдельным районам обеспе-

Таблица 2

**Распределение лесных ресурсов
по лесоэкономическим районам Иркутской области**

Лесоэкономический район	Лесистость территории, %	Лесопокрытая площадь, тыс. га
Катангский	88,9	12 383
Прижелезнодорожный	73,9	16 040
Усть-Илимский	87,8	4 179
Верхнеленский	90,1	14 948
Мамско-Бодайбинский	76,3	10 328
Братский	82,2	3 923
УОБ АО	51,9	1 150
Всего по Иркутской области	81,1	62 951

ченность лесами на одного жителя колеблется от 0,2 га (Ангарский район вместе с г. Ангарск) до 1949 га (Катангский район) [Атлас..., 2004].

По данным Государственного лесного реестра на 01.01.2011 г., общая площадь лесов Иркутской области составляет 62 781 016 га, в том числе хвойных 45 688 828 га, или 73 %, из которых на долю сосновых древостоев приходится 34 %, еловых – 7 %, лиственничных – 40 % [Форма..., 2011].

Распределение площади сосновых, еловых и лиственничных древостоев по лесничествам Иркутской области приведено в Приложении 1. На рис. 7

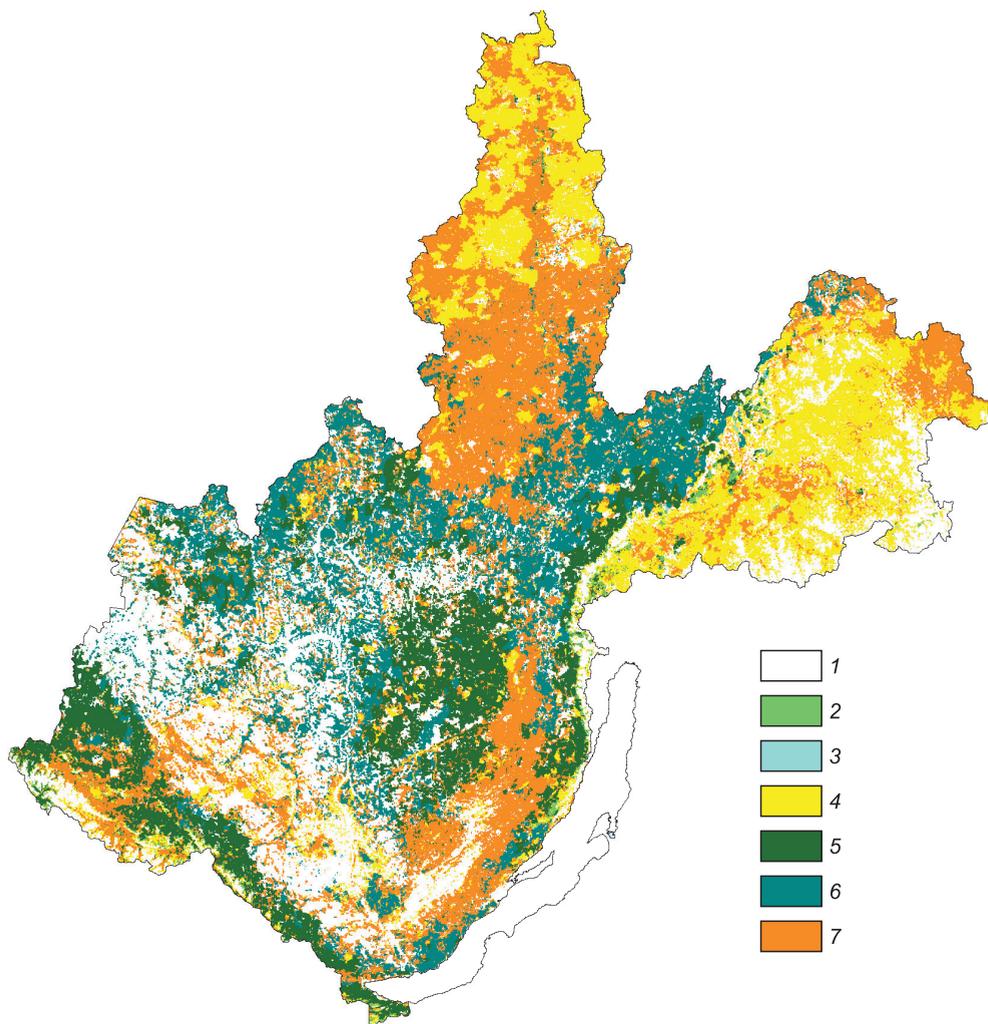


Рис. 7. Картограмма хвойных лесов Иркутской области [Барталев и др., 2004].

Группы пород и сомкнутость древостоев: 1 – обезлесенные территории или занятые лесами других групп. Редкостойные леса (сомкнутость крон 10–39 %): 2 – темнохвойные, 3 – сосновые, 4 – лиственничные. Сомкнутые леса (сомкнутость крон 40–100 %): 5 – темнохвойные, 6 – сосновые, 7 – лиственничные.

представлена карта распределения сосновых, лиственничных и темнохвойных лесов по территории области [Барталев и др., 2004]. Основные массивы с участием исследуемых видов хвойных сосредоточены в северной и центральной частях области. В таких административных районах, как Катангский, Бодайбинский, Киренский, Усть-Кутский, Мамско-Чуйский, Усть-Илимский, Казаченско-Ленский, Братский, Нижнеилимский, Качугский, Нижнеудинский, Чунский и Жигаловский, площадь хвойных древостоев составляет от 1 до 8 млн га, в остальных районах она на один-два порядка меньше. Южные районы области имеют наименьшие территории, покрытые хвойными древостоями. Здесь расположены крупные Ангарско-Усольский, Иркутский и Шелеховский промышленные центры, а также сосредоточены основные сельскохозяйственные районы (Балаганский, Куйтунский, Тулунский, Заларинский, Зиминский, районы Усть-Ордынского Бурятского автономного округа), специализирующиеся на производстве зерновых, овощной и мясомолочной продукции.

5.1. Удельная и общая фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев

Для исследования изменения фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев по территории области были использованы данные фотосинтеза трех видов хвойных, широко представленных в Иркутской области и имеющих важное хозяйственное и экологическое значение: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.).

Для 2003, 2008–2010 гг. была определена удельная (в расчете на единицу площади) продуктивность фотосинтеза CO_2 древостоев сосны, ели и лиственницы. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Для определения динамики фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев на территории Иркутской области по годам были приняты допущения, что в текущий вегетационный период фотосинтез в хвойных древостоях протекает примерно одинаково на всей территории области и климатические условия по области достаточно однородны [Суворова и др., 2010]. Эти допущения соответствуют принципам проведения эколого-физиологических экспериментов.

Для всех административных районов Иркутской области для благоприятных вегетационных периодов 2008–2010 гг. и засушливого 2003 года была рассчитана продуктивность фотосинтеза хвойных древостоев (см. Приложение 2).

Поскольку гидротермические условия 2008–2010 гг. сопоставимы, величины годовой фотосинтетической продуктивности древостоев этих лет

Таблица 3

Удельная годовая продуктивность фотосинтеза (GPP , т $\text{CO}_2/\text{га}$) хвойных древостоев Иркутской области

Год	Сосна	Ель	Лиственница
2003	8,05	13,46	15,32
2008	11,45	25,29	31,95
2009	12,89	23,74	28,71
2010	12,82	28,63	26,00

различались незначительно, соответственно по районам области существенной разницы в значениях продуктивности хвойных не было выявлено. Общая по области продуктивность хвойных древостоев за период 2008–2010 гг. изменялась от 695,8 до 756,8 млн т CO₂. Однако при сравнении засушливого 2003 и оптимально влажного 2010 годов были выявлены довольно существенные различия – в среднем в 1,7 раза (рис. 8).

Общая продуктивность по области в 2003 г. составляла 406,7 млн т, в 2010 г. – 695,8 млн т CO₂. Отмечается разница в фотосинтетической продуктивности в зависимости от вида дерева. Сосновые древостои показывают

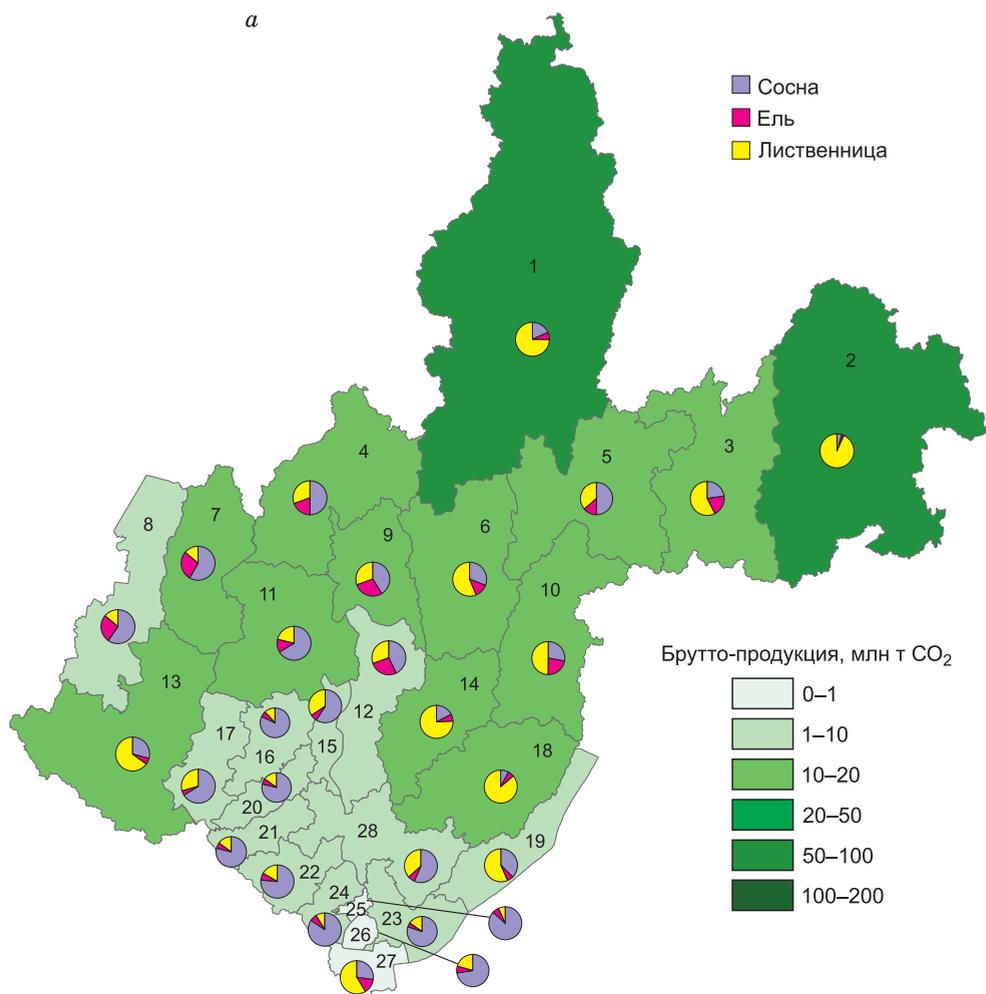
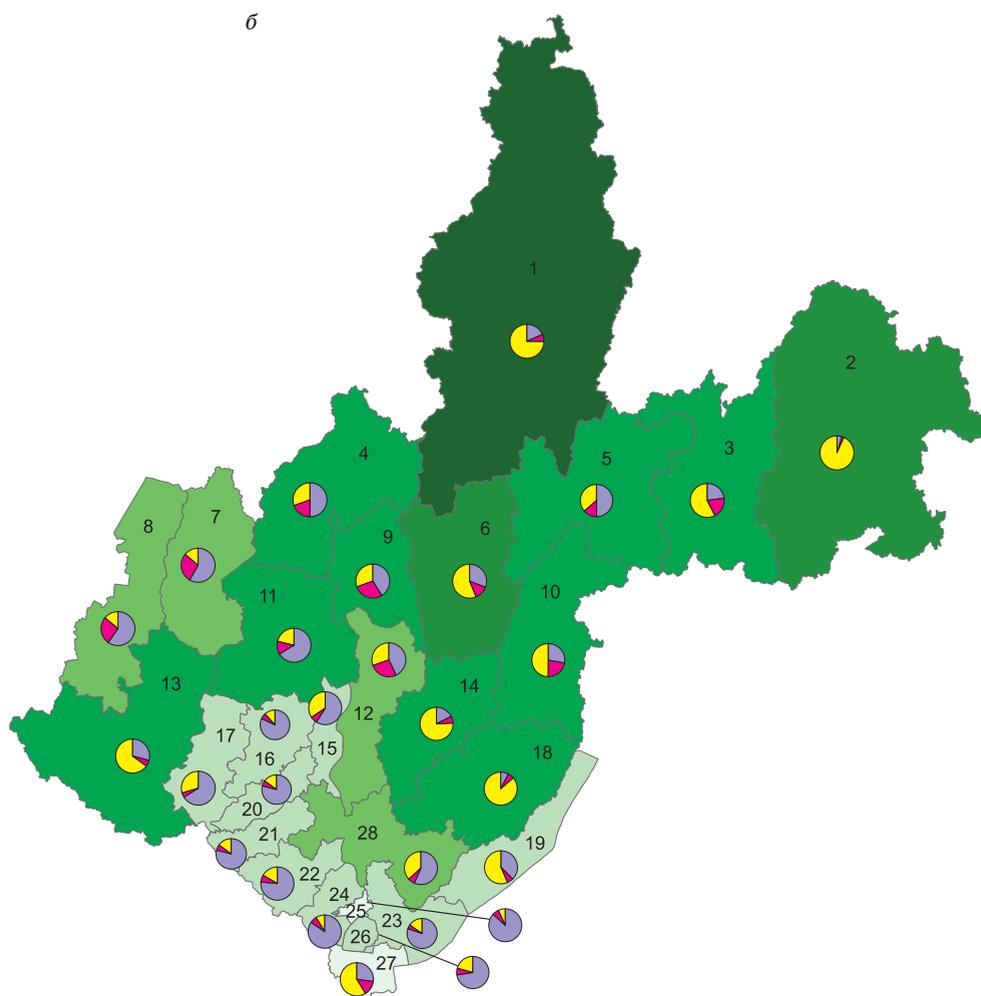


Рис. 8. Картограмма фотосинтетической продуктивности (GPP) хвойных древостоев Иркутской области в 2003 г. (а) и 2010 г. (б).

Административные районы: 1 – Катангский, 2 – Бодайбинский, 3 – Мамско-Чуйский, 4 – Усть-Илимский, 5 – Киренский, 6 – Усть-Кутский, 7 – Чунский, 8 – Тайшетский, 9 – Нижнеилимский, 10 – Казаченско-Ленский, 11 – Братский, 12 – Усть-Удинский, 13 – Нижнеудин-

высокие значения стока CO_2 главным образом за счет широкого распространения, лиственничные – из-за высокой ассимиляционной способности и широкого распространения, еловые – за счет большой ассимилирующей массы на единицу занимаемой территории.

В 2010 г. высокой фотосинтетической продуктивностью характеризовались хвойные древостои Катангского, Бодайбинского и Усть-Кутского районов, которые поглощали в процессе фотосинтеза от 50 до 200 млн т CO_2 в год, что связано со значительной долей хвойных древостоев на территории районов – от 50 до 80 % (см. рис. 8, б). В экстремальном по климатическим



ский, 14 – Жигаловский, 15 – Балаганский, 16 – Куйтунский, 17 – Тулунский, 18 – Качугский, 19 – Ольхонский, 20 – Зиминский, 21 – Заларинский, 22 – Черемховский, 23 – Иркутский, 24 – Усольский, 25 – Ангарский, 26 – Шелеховский, 27 – Слюдянский; 28 – Усть-Ордынский Бурятский автономный округ.

условиям 2003 году наиболее продуктивными (выше 50 млн т CO_2) были Катангский и Бодайбинский районы (см. рис. 8, а).

Средней фотосинтетической продуктивностью (от 10 до 50 млн т CO_2) в 2010 г. характеризовались хвойные древостои Братского, Верхнеленского, Усть-Илимского лесозономических районов, Усть-Ордынского Бурятского автономного округа, а также Мамско-Чуйского, Нижнеудинского, Тайшетского, Чунского административных районов (см. рис. 8, б). В 2003 г. в данном диапазоне фотосинтетической продуктивности оказались все указанные районы, за исключением Тайшетского, Усть-Удинского районов и районов, входящих в состав Усть-Ордынского Бурятского автономного округа (см. рис. 8, а).

Низкими ассимиляционными возможностями (до 10 млн т CO_2) отличались в 2010 г. хвойные древостои Ангарского, Балаганского, Заларинского, Зиминского, Иркутского, Куйтунского, Ольхонского, Слюдянского, Тулунского, Усольского, Черемховского и Шелеховского районов, расположенных в южной части области (см. рис. 8, б). В 2003 г. в этом списке были также Тайшетский, Усть-Удинский районы и Усть-Ордынский Бурятский автономный округ (см. рис. 8, а). Такие значения связаны со снижением биомассы хвойных древостоев и распространением сельскохозяйственных угодий, с преобладанием на территории районов сосновых древостоев, для которых характерна более низкая удельная (т/га) ассимиляционная способность по сравнению с лиственничными и еловыми лесами. Следует отметить, что Слюдянский район отнесен к низкопродуктивной группе условно, поскольку на его территории преобладают кедровые и пихтовые древостои, для которых не проводилось расчетов ассимиляционной активности. Ангарский район имеет наименьшую из всех муниципальных образований площадь – 1149 км², и хотя лесной растительностью покрыто 93 % земель района, из которых 54 % занято хвойными древостоями, общая фотосинтетическая продукция их невысокая.

Таким образом, хвойные древостои северных и центральных районов области обладают высоким уровнем брутто-продукции по сравнению с южными, где продуктивность фотосинтеза древостоев ниже на порядок и более. Выявленные территориальные различия стока CO_2 обусловлены в основном тем, что хвойные массивы в южных районах области слабо распространены.

5.2. Первичная нетто-продукция хвойных древостоев

Первичная нетто-продукция (NPP) измеряется количеством органической массы (выраженной в количестве сухого вещества или углерода), произведенной экосистемой и запасенной в тканях растений за единицу времени. Этот показатель является одним из основных индикаторов эффективности функционирования лесных экосистем и важным компонентом углеродного бюджета лесов.

Известно, что соотношение GPP и NPP может меняться в зависимости от условий, но в большинстве случаев оно близко к 2:1, и МГЭИК в своих оценках придерживается именно этой величины, т. е. в расчетах в основном

оперируют соотношением $2NPP = GPP$ [Кудеяров и др., 2007]. Исходя из этого соотношения по значениям фотосинтетической продуктивности была определена удельная нетто-продукция S хвойных древостоев Иркутской области (табл. 4).

Средняя величина NPP хвойных древостоев в благоприятные 2008–2010 годы в единицах углерода составила 2,71 т/(га·год), для сосны это значение определено в 1,69, ели – 3,53, лиственницы – 3,94 т/(га·год). В экстремальный 2003 год нетто-продукция снизилась в 1,5–2 раза.

По данным Л.Н. Ващука и А.З. Швиденко [2006], средняя величина чистой первичной продукции хвойных лесов Иркутской области составляет 3,25 т С/га в год, что близко к определенным нами значениям, полученным эколого-физиологическим методом. Причины 17%-х расхождений в значениях NPP , полученных разными методами, могут заключаться в следующем: нами определена чистая первичная продукция, без учета пихтовых и кедровых древостоев на территории области; в работе [Ващук, Швиденко, 2006] NPP определена с учетом нижнего яруса (подроста и подлеска). Следовательно, можно говорить об удовлетворительной сходимости данных по нетто-продукции, полученных эколого-физиологическим и лесотаксационным методами.

Чистая первичная продукция хвойных древостоев по административным районам области была рассчитана за все исследуемые годы (см. Приложение 3). По средним значениям (2008–2010 гг.) в программе ArcView построена картосхема (рис. 9). Из представленных данных видно, что колебания нетто-продукции хвойных древостоев по муниципальным районам составляют от 0,1 до 24,0 млн т углерода в год.

Наиболее продуктивными являются хвойные древостои северных районов области (Бодайбинский и Катангский), где величина NPP изменяется от 14,3 до 24,0 млн т С в год. Хвойные древостои с низкой чистой первичной продукцией S от 0,1 до 0,8 млн т/год сосредоточены в южной части области (Ангарский, Балаганский, Заларинский, Зиминский, Иркутский, Куйтунский, Ольхонский, Слюдянский, Усольский, Черемховский, Шелеховский районы). В остальных 15 районах хвойные древостои характеризуются средними значениями нетто-продукции углерода (1,2–7,4 млн т/год).

В целом по Иркутской области величина чистой первичной продукции хвойных древостоев в благоприятные 2008–2010 гг. изменялась от 94,9 до 103,2 млн т С со средним значением 98,9 млн т С в год. В засушливый 2003 год NPP сократилась до 55,5 млн т С.

Таким образом, представленные выше результаты показывают, что удельная брутто-продукция (GPP) в экстремальных условиях вегетации снижается в сосновых древостоях в 1,5 раза, а в еловых и лиственничных – в 2 раза по сравнению с ее величиной в благоприятные по увлажнению годы.

Таблица 4

Удельная нетто-продукция фотосинтеза (NPP , т С/га) хвойных древостоев Иркутской области

Год	Сосна	Ель	Лиственница
2003	1,10	1,84	2,09
2008	1,56	3,45	4,36
2009	1,76	3,24	3,92
2010	1,75	3,90	3,54

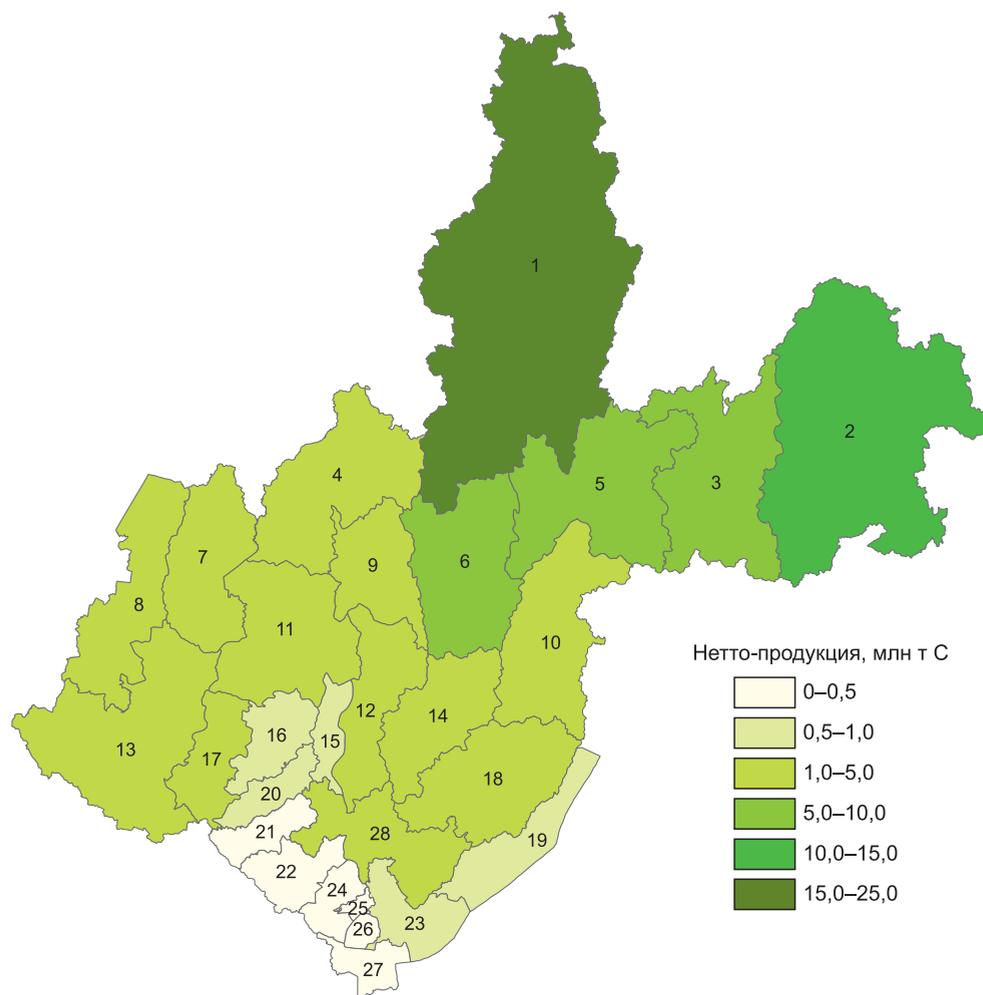


Рис. 9. Картограмма нетто-продукции хвойных древостоев Иркутской области по средним значениям за 2008–2010 гг.

Усл. обозн. см. рис. 8.

Общая фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев области в зависимости от сезона вегетации изменяется в широком диапазоне – от 406,7 до 756,8 млн т CO_2 . Хвойные древостои северных и центральных районов определяют более высокие значения брутто-продукции по сравнению с южными, где продуктивность фотосинтеза ниже на порядок и более, что связано с уровнем распределения лесных массивов. Отличия в фотосинтетической продуктивности сосновых древостоев обусловлены их более широким распространением по области в сравнении с другими хвойными; лиственных – более высокой ассимиляционной способностью хвои и широким распространением; еловых, несмотря на их ограниченное распространение, – большой ассимилирующей массой на единицу занимаемой площади.

Расчеты чистой первичной продукции (NPP) в единицах углерода показали, что в 2008–2010 гг. для сосны эти значения изменялись в диапазоне 1,6–1,8 т/га, ели – 3,2–3,9, лиственницы – 3,5–4,4 т/га в год. На примере 2003 г. нами впервые показано, что NPP в экстремальных условиях вегетации может снижаться в сосновых древостоях до 1,1 т/га, еловых – до 1,8, лиственничных – до 2,1 т/га в год.

По нашим данным, в целом по Иркутской области средняя величина нетто-продукции составляет 98,9 млн т С в год. По данным Л.Н. Ващука и А.З. Швиденко [2006], суммарная чистая первичная продукция сосновых, еловых и лиственничных древостоев Иркутской области оценена в 120,0 млн т С в год, что на 18 % выше определенных нами значений.

А.З. Швиденко с соавт. [2008б] оценивают нетто-продукцию сосновых древостоев России в 339,0 млн т, еловых – 268,5 млн т, лиственничных – 720,0 млн т С в год. Исходя из этих данных доля сосновых древостоев Иркутской области составляет 7,7 %, еловых – 4,2 %, лиственничных – 8,5 % от значений по России.

По данным Д.Г. Замолодчикова и А.И. Уткина [2000], для основных лесообразующих пород лесного фонда России NPP определена в (1800 ± 500) млн т/год. По расчетам Б.Н. Моисеева и И.О. Алябиной [2007], чистая первичная продукция углерода во всех биомсах России составляет 2745 млн т/год. По данным А.З. Швиденко с соавт. [2008б], общая NPP всех российских лесов оценивается в 2308 млн т/год. Таким образом, доля нетто-продукции хвойных древостоев Иркутской области по отношению к NPP биомов и лесов России составляет 3,6–5,5 %.

Известно [Щепаченко и др., 2008], что растительностью земного шара ежегодно поглощается около 55–60 Пг С $((55-60) \cdot 10^9$ т) в виде чистой первичной продукции. Из этого следует, что доля NPP хвойных древостоев Иркутской области от мировых значений составляет 1,6–1,8 %.

Таким образом, данные брутто- и нетто-продукции хвойных древостоев Иркутской области, полученные эколого-физиологическим методом, согласуются с результатами лесотаксационных исследований. В то же время эколого-физиологический метод имеет преимущество перед традиционным, поскольку позволяет дифференцированно оценить потоки (GPP) и сток (NPP) углерода в любых условиях вегетации и на основе этих данных делать более обоснованные прогнозы динамики GPP и NPP хвойных древостоев на больших территориях при изменении климата в глобальном масштабе.

Лесные экосистемы играют огромную роль в регуляции газового баланса и газового состава атмосферы. Общепланетарная функция лесов заключается в аккумуляции в процессе фотосинтеза атмосферного CO_2 природного и техногенного происхождения, синтезе органического вещества и выделении кислорода.

Фотосинтез является основным источником возобновления кислорода на Земле. Благодаря процессу фотосинтеза концентрация кислорода в атмосфере поддерживается на постоянном уровне.

Способность лесных экосистем поглощать в процессе фотосинтеза атмосферный углерод в настоящее время приобретает особую значимость. Одним из главных, в том числе в контексте Киотского протокола, является вопрос о количественном соотношении между техногенными выбросами CO_2 и CO_2 -ассимиляционным потенциалом лесов.

Ниже рассмотрен процесс продуцирования кислорода хвойными древостоями Иркутской области, а также исследована способность хвойных древостоев поглощать в процессе фотосинтеза выбросы углекислого газа от энергетического сектора Иркутской области.

6.1. Продуцирование кислорода хвойными древостоями области

Количество кислорода, выделяемого хвойными древостоями, было рассчитано по фотосинтетической продуктивности хвои. При исследовании динамики продукции O_2 в период вегетации кислородопродуцирующая функция хвойных определена в условиях почвенной засухи 2003 г. и в благоприятные по уровню влаго- и теплообеспеченности вегетационные сезоны 2008–2010 гг. (рис. 10).

Из данных, представленных на рис. 10, следует, что удельные для территории объемы кислорода, выделяемого в процессе фотосинтеза в сосновых древостоях, изменяются в диапазоне 5,85–9,38 т/га, еловых – 9,79–20,82, лиственничных – 11,14–23,24 т/га. В благоприятные по увлажнению вегетационные периоды 2008–2010 гг. продукция O_2 древостоев высокая и по годам изменяется незначительно, однако в засушливый 2003 год ее уровень снижается в 1,5–2 раза.

На рис. 11 представлены расчетные данные по продуцированию кислорода хвойными древостоями по административным районам Иркутской области (см. Приложение 4).

Анализ показывает, что продукция кислорода хвойных древостоев в зависимости от периода вегетации (2003, 2008–2010 гг.) изменяется от 300 тыс. т O_2 (Слюдянский район) до 137 млн т O_2 (Катангский район).

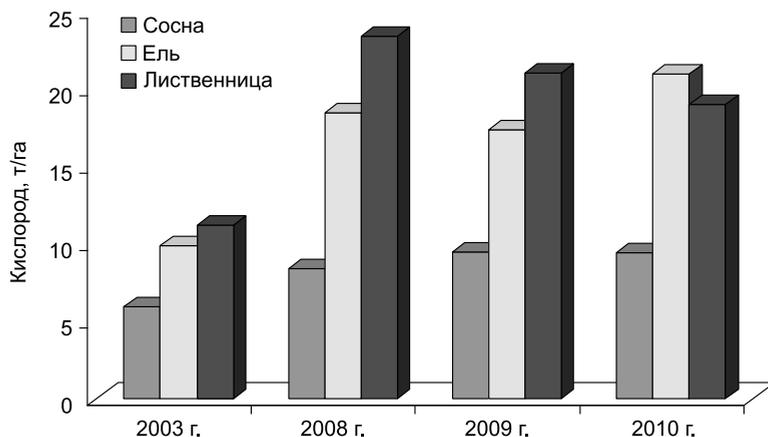


Рис. 10. Годичная продукция кислорода хвойных древостоев на территории Иркутской области в засушливый (2003) и оптимально влажные (2008–2010) годы.

В 2008–2010 гг. максимальные значения данного показателя находятся в диапазоне 120–137 млн т O_2 . В условиях засухи 2003 г. продукция кислорода в каждом районе области снижается в 1,5–2 раза.

При сопоставлении расчетных значений фотосинтетической продуктивности и продукции O_2 выявлено, что в среднем за 2008–2010 гг. все хвой-

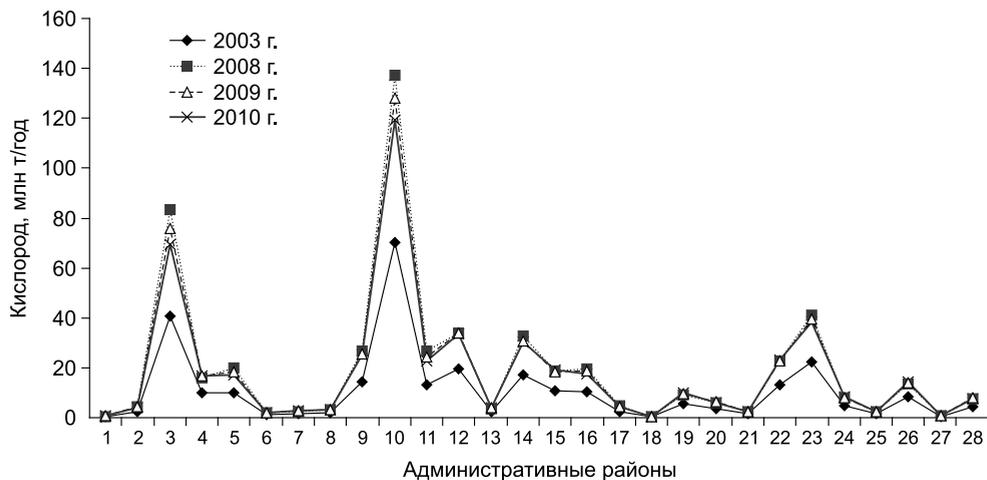


Рис. 11. Продукция кислорода хвойных древостоев на территории административных районов Иркутской области в 2003, 2008–2010 гг.

Административные районы: 1 – Ангарский, 2 – Балаганский, 3 – Бодайбинский, 4 – Братский, 5 – Жигаловский, 6 – Заларинский, 7 – Зиминский, 8 – Иркутский, 9 – Казаченско-Ленский, 10 – Катангский, 11 – Качугский, 12 – Киренский, 13 – Куйтунский, 14 – Мамско-Чуйский, 15 – Нижнеилимский, 16 – Нижнеудинский, 17 – Ольхонский, 18 – Слюдянский, 19 – Тайшетский, 20 – Тулунский, 21 – Усольский, 22 – Усть-Илимский, 23 – Усть-Кутский, 24 – Усть-Удинский, 25 – Черемховский, 26 – Чунский, 27 – Шелеховский; 28 – Усть-Ордынский Бурятский автономный округ.

Таблица 5

Продукция кислорода хвойных древостоев Иркутской области

Год	Продукция кислорода, л/чел.	Обеспеченность O ₂ одного жителя, лет	
		в состоянии покоя	при тяжелой мышечной работе
2003	80 851 387	624	56
2008	150 449 690	1161	104
2009	143 856 919	1110	100
2010	138 328 061	1067	96

ные древостои Иркутской области поглощают 725 млн т CO₂ и выделяют 528 млн т O₂.

Для количественной оценки санитарно-гигиенической функции хвойных древостоев была рассчитана обеспеченность кислородом населения Иркутской области (табл. 5). При расчетах учитывали экспериментальные данные, в соответствии с которыми человек в покое при минимальном газообмене потребляет O₂ около 250 мл/мин. При тяжелой мышечной работе потребление кислорода увеличивается в 10 раз и более, что составляет примерно 2500–3000 мл/мин [Чарный, 1961].

Результаты расчетов показывают (см. табл. 5), что в Иркутской области за период 2008–2010 гг. ежегодный объем продуцируемого кислорода в расчете на одного человека изменяется незначительно – от 138,3·10⁶ до 150,4·10⁶ л, что обеспечивает жизнедеятельность одного человека в состоянии покоя более чем на 1000 лет и при выполнении тяжелой мышечной работы – на 100 лет. При экстремальных условиях вегетации количество продуцируемого кислорода значительно меньше за счет снижения фотосинтетической продуктивности и увеличения дыхательной активности хвои [Щербатюк и др., 1991]. Так, в засушливый вегетационный сезон 2003 г. данный показатель снижался до 80,9·10⁶ л/чел., что может обеспечить жизнедеятельность одного человека на 624 года в состоянии покоя и на 56 лет при выполнении тяжелой мышечной работы.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод, что хвойные древостои Иркутской области независимо от гидротермических условий вегетации выделяют колоссальный объем кислорода. Санитарно-гигиеническая функция хвойных древостоев Иркутского региона, оцененная по показателю обеспеченности населения фотосинтетическим кислородом, находится на высоком уровне.

6.2. Соотношение суммарных выбросов CO₂ от предприятий теплоэнергетики и фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев

Для определения валового выброса диоксида углерода от районных котельных, находящихся в ведении министерства ЖКХ Иркутской области в 2010 г., были использованы данные паспорта жилищно-коммунального хо-

Таблица 6

**Валовый выброс углекислого газа от муниципальных котельных
и предприятий ОАО "Иркутскэнерго" в 2010 г.**

Административный район	Валовый выброс CO ₂ , т		Всего, т CO ₂
	Районные котельные	ОАО "Иркутскэнерго"	
Ангарский	6042	7 233 428	7 239 470
Балаганский	6858	–	6858
Бодайбинский	214 121	–	214 121
Братский	293 459	3 008 788	3 302 247
Жигаловский	8966	–	8966
Заларинский	37 656	–	37 656
Зиминский	62 971	1 476 573	1 539 544
Иркутский	919 587	3 867 107	4 786 694
Казаченско-Ленский	76 246	–	76 246
Катангский	3	–	3
Качугский	15 836	–	15 836
Киренский	64 097	–	64 097
Куйтунский	31 378	–	31 378
Мамско-Чуйский	78 448	–	78 448
Нижнеилимский	132 127	319 587	451 714
Нижнеудинский	174 101	–	174 101
Ольхонский	9977	–	9977
Слюдянский	236 858	–	236 858
Тайшетский	312 759	–	312 759
Тулунский	194 684	–	194 684
Усольский	83 974	1 441 801	1 525 775
Усть-Илимский	30 865	1 594 060	1 624 925
Усть-Кутский	396 160	–	396 160
Усть-Удинский	12 026	–	12 026
Черемховский	158 257	181 685	339 942
Чунский	105 712	–	105 712
Шелеховский	12 085	401 873	413 958
УОБ АО	37 365	–	37 365
Всего по области	3 709 929	19 524 902	23 234 831

зяйства Иркутской области, подготовленного областным государственным казенным учреждением "Аналитическая оперативно-диспетчерская служба жилищно-коммунального хозяйства Иркутской области" [Паспорт..., 2011], в котором представлены сведения о количестве твердого, жидкого и газообразного топлива, израсходованного для получения тепловой энергии за год всеми муниципальными теплоисточниками (котельными) Иркутской области (см. Приложение 5). Полученные данные представлены в табл. 6.

Валовый объем выбросов CO₂ от котельных по муниципальным районам области изменяется от 3 т (Катангский район) до 9,2·10⁵ т (Иркутский район). Наибольшее количество техногенного CO₂ (от 1,1·10⁵ до 9,2·10⁵ т)

выделялось котельными, расположенными в Иркутском, Усть-Кутском, Тайшетском, Братском, Слюдянском, Бодайбинском, Тулунском, Нижнеудинском, Черемховском, Нижнеилимском и Чунском районах. В остальных 16 районах, включая Усть-Ордынский Бурятский АО, масса выбросов CO_2 не превышает 10^5 т в год.

Для определения суммарного количества CO_2 , поступающего в атмосферный воздух, рассчитанные значения объемов выбросов от муниципальных котельных были объединены с объемами выбросов от тепловых электростанций и котельных ОАО «Иркутскэнерго». Результаты представлены в табл. 6 и на рис. 12.

В совокупности в 2010 г. от предприятий ОАО «Иркутскэнерго» и муниципальных котельных области в атмосферу поступило 23,2 млн т CO_2 . Основной вклад в общий выброс углекислого газа внесли предприятия ОАО «Иркутскэнерго», их доля составила 84 %, доля районных котельных – 16 %.

Наибольший валовый выброс диоксида углерода в 1,5–7,0 млн т CO_2 приходился на Ангарский, Иркутский, Братский, Усть-Илимский, Зиминский и Усольский районы (см. рис. 12). В этих районах сосредоточено более половины населения области (63 %), а также расположены основные промышленные производства. На порядок ниже количество выбросов CO_2 в Нижнеилимском, Шелеховском, Усть-Кутском, Черемховском, Тайшетском, Слюдянском, Бодайбинском, Тулунском, Нижнеудинском, Чунском районах – 100–450 тыс. т. В остальных районах (Мамско-Чуйском, Казаченско-Ленском, Киренском, Усть-Ордынском Бурятском АО, Заларинском, Куйтунском, Ка-

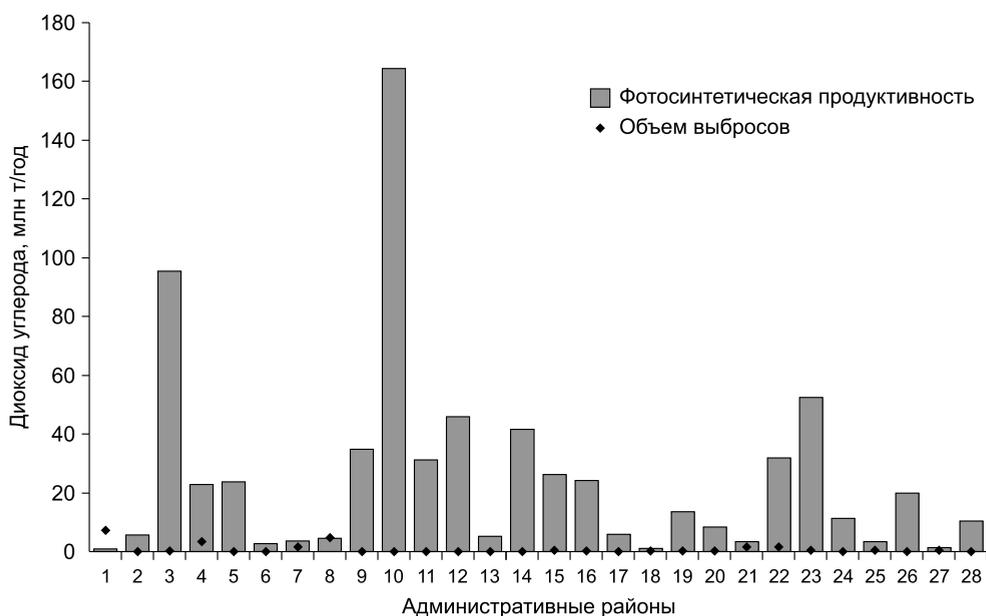


Рис. 12. Фотосинтетическая продуктивность древостоев и суммарные выбросы CO_2 от муниципальных котельных и предприятий ОАО «Иркутскэнерго» в 2010 г.

Усл. обозн. см. рис. 11.

чугском, Усть-Удинском, Ольхонском, Жигаловском, Балаганском, Катангском) валовый выброс находился в пределах от 3 т до 78 тыс. т CO₂. Эта группа районов характеризуется малой численностью населения (13 % общей по области) и отсутствием крупных промышленных предприятий.

Из сопоставления с этими данными газопоглодительной способности лесов за 2010 г. следует, что высокой ассимиляционной активностью (52,5–164,3 млн т CO₂) обладают хвойные древостои Катангского, Бодайбинского и Усть-Кутского районов (см. рис. 12). В Братском, Верхнеленском, Усть-Илимском лесоэкономических районах, а также Мамско-Чуйском, Нижнеудинском, Тайшетском и Чунском административных районах фотосинтетическая продуктивность хвойных ниже и составляет 10,5–46,0 млн т CO₂. Наиболее низким ассимиляционным потенциалом (0,7–8,5 млн т CO₂) характеризуются хвойные древостои Ангарского, Балаганского, Заларинского, Зиминского, Иркутского, Куйтунского, Ольхонского, Слюдянского, Тулунского, Усольского, Черемховского и Шелеховского районов.

Общие по области выбросы углекислого газа от энергетического сектора в 2010 г. составили $23,2 \cdot 10^6$ т (см. табл. 6), в то время как ассимиляционные возможности исследуемых видов хвойных – $695,8 \cdot 10^6$ т CO₂. Эти данные свидетельствуют, что фотосинтетическое поглощение хвойных древостоев Иркутской области превышает эмиссию углекислого газа от предприятий теплоэнергетики на 97 %. В то же время следует отметить, что в данном исследовании остаются неучтенными не менее важные источники выбросов CO₂ от печного отопления частного сектора, работы автотранспорта и нефтехимических предприятий области, которые в сумме могут достигать 43–60 % от выбросов CO₂ теплоэнергетического сектора [Государственный доклад..., 2011].

Для оценки способности хвойных древостоев ассимилировать в процессе фотосинтеза CO₂ антропогенного происхождения был разработан коэффициент эффективности газопоглодительной (CO₂-поглодительной) активности лесов (КЭГАЛ). Напомним, что коэффициент численно рассчитывается как отношение суммарного объема выбросов CO₂ от предприятий теплоэнергетики к фотосинтетической способности (GPP) хвойных древостоев данного муниципального образования.

На основе полученных данных при помощи программного пакета ArcView GIS 3.3 была построена картосхема газопоглодительной способности хвойных древостоев отдельных административных районов Иркутской области (рис. 13).

Анализ показал, что в двух районах (Ангарский, Иркутский) значение КЭГАЛ превысило единицу и составило 8,57 и 1,07 соответственно, что свидетельствует о превышении техногенных выбросов CO₂ над ассимиляционной возможностью хвойных древостоев на данных территориях.

Суммарные выбросы углекислого газа в Ангарском районе являются самыми высокими по региону (7,2 млн т), при этом ассимиляционные возможности хвойных древостоев этого района весьма низкие и составляют 0,12 % от общего значения по области.

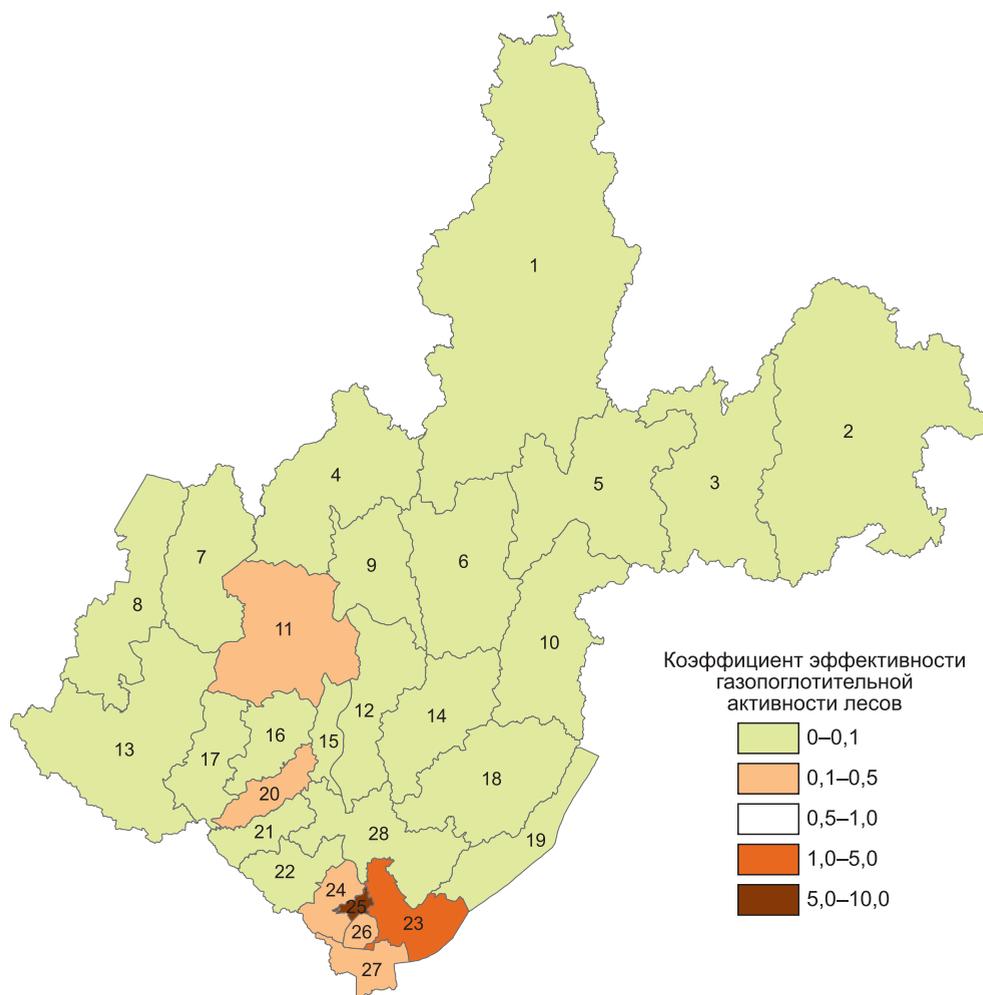


Рис. 13. Картограмма газопоглодительной активности хвойных древостоев административных районов Иркутской области.

Усл. обозн. см. рис. 8.

В Иркутском районе значение КЭГАЛ близко к нормальному – 1,07. Здесь объемы выбросов превышают фотосинтетическую продуктивность хвойных примерно на 300 тыс. т CO_2 в год.

В Усольском, Зиминском, Слюдянском, Шелеховском, Братском и Черемховском районах КЭГАЛ равны 0,44; 0,41; 0,33; 0,33; 0,14 и 0,10 соответственно, т. е. в данных районах области хвойные древостои способны с превышением ассимилировать весь CO_2 , выделяемый в процессе сжигания топлива на предприятиях ОАО “Иркутскэнерго” и муниципальных котельных. В остальных районах (Балаганский, Бодайбинский, Жигаловский, Заларинский, Казаченско-Ленский, Катангский, Качугский, Киренский, Куйтунский, Мам-

ско-Чуйский, Нижнеилимский, Нижнеудинский, Ольхонский, Тайшетский, Тулунский, Усть-Илимский, Усть-Кутский, Усть-Удинский, Чунский районы, Усть-Ордынский Бурятский автономный округ) коэффициент составляет менее одной десятой. Здесь ассимиляционные возможности хвойных древостоев превышают объемы выбросов углекислого газа в десятки и сотни раз, в Жигаловском районе – в тысячи, а в Катангском – в миллионы раз. Такие значения коэффициента связаны с отсутствием крупных предприятий теплоэнергетики, за исключением Нижнеилимского и Усть-Илимского районов, а также с тем, что в этих 20 районах сконцентрировано только 34 % населения области и поэтому требуются меньшие объемы топлива для производства тепла и электроэнергии.

Результаты анализа свидетельствуют, что газопоглодительная функция хвойных древостоев административных районов Иркутской области высокая. В 26 районах складывается благоприятная ситуация, значения КЭГАЛ здесь находятся в диапазоне от 0,00 до 0,44. В Ангарском и Иркутском районах фотосинтетическое поглощение хвойных древостоев ниже в 1,07 и 8,57 раза объемов техногенных выбросов CO₂. В связи с этим необходимо проведение мероприятий по увеличению доли хвойных насаждений в лесных массивах для биологической фиксации углекислого газа, а также совершенствование технологий, направленных на сокращение промышленных выбросов CO₂.

6.3. Соотношение выбросов CO₂ от предприятий ОАО “Иркутскэнерго” и фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев

Электроэнергетика является крупнейшим потребителем первичных топливных ресурсов в нашей стране. Главным производителем тепла и электроэнергии в Иркутской области является Иркутское открытое акционерное общество энергетики и электрификации (ОАО “Иркутскэнерго”). Это крупнейший потребитель органического топлива в Сибири. В топливном балансе электростанций компании доля угля составляет 99,3 %, доля мазута – 0,7 % [Функционирование..., 2005].

Компанией “Иркутскэнерго” были предоставлены данные о количестве выбросов CO₂ от девяти ТЭЦ и двух котельных за период 2008–2010 гг., находящихся в их ведомстве и расположенных на территории девяти административных районов Иркутской области: Ангарского, Братского, Зиминского, Иркутского, Нижнеилимского, Усольского, Усть-Илимского, Черемховского и Шелеховского, являющихся главными промышленно развитыми районами области. На основе этих данных были оценены условная нагрузка CO₂-выбросов в атмосферу районов и газопоглодительная активность хвойных древостоев, произрастающих на их территории.

Суммарный объем выбросов CO₂ от предприятий ОАО “Иркутскэнерго” в 2008 г. составил 23,5·10⁶ т CO₂, что выше значений в 2009 и 2010 гг. на 22 и 17 % соответственно.

На рис. 14 представлена динамика объемов выбросов углекислого газа по районам за исследуемый период.

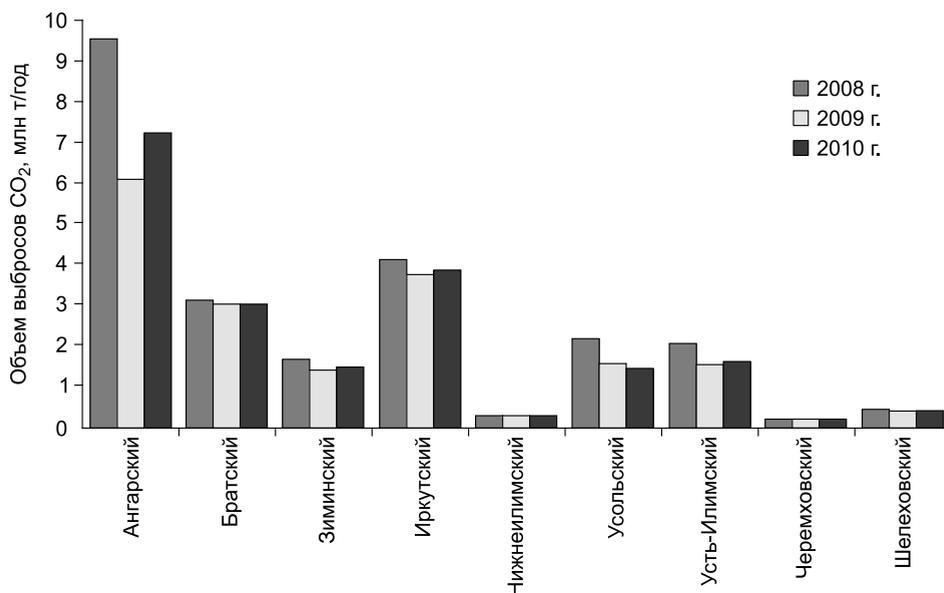


Рис. 14. Объем выбросов углекислого газа по административным районам области от предприятий ОАО "Иркутскэнерго".

Как видно на рис. 14, наибольшее количество техногенного CO_2 выделяется от ТЭЦ, расположенных на территории Ангарского, Иркутского и Братского районов, на их долю приходится от 13 до 41 % выбросов по области. К районам со средним уровнем CO_2 -выбросов можно отнести Зиминский, Усольский и Усть-Илимский районы. Нижне-Илимский, Черемховский и Шелеховский районы характеризуются низким уровнем CO_2 -выбросов. В исследуемых районах в 2009–2010 гг. объемы выделяемого диоксида углерода сравнительно близки, однако по отношению к 2008 г. в таких районах, как Ангарский, Усольский, Усть-Илимский, выявлено существенное сокращение выбросов (до 22–36 %) за счет реализации ОАО "Иркутскэнерго" мероприятий по оптимизации тепловых узлов, топливного баланса и совершенствованию системы электроснабжения.

Для рассматриваемых районов Иркутской области была рассчитана годовичная фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев. Результаты расчетов представлены в табл. 7.

Из данных табл. 7 следует, что фотосинтетическая ассимиляция углекислого газа хвойными в районах изменяется в интервале от $0,8 \cdot 10^6$ до $31,8 \cdot 10^6$ т CO_2 . Существенных колебаний поглощения CO_2 по годам не отмечается. Наибольшей фотосинтетической продуктивностью отличаются хвойные древостои Усть-Илимского, Нижнеилимского и Братского районов, поскольку они относятся к пяти самым лесистым в области.

Далее был рассчитан коэффициент эффективности газопоглодительной (CO_2 -поглодательной) активности лесов. Результаты расчета приведены на рис. 15.

Таблица 7

**Годичная фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев
за 2008–2010 гг.**

Административный район	Фотосинтетическая продуктивность, т CO ₂		
	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Ангарский	772 795	841 404	844 840
Братский	22 082 763	22 959 301	22 883 054
Зиминский	3 525 325	3 757 544	3 725 845
Иркутский	4 246 109	4 547 416	4 493 289
Нижнеилимский	25 789 247	25 497 372	26 169 620
Усольский	3 223 602	3 493 240	3 481 714
Усть-Илимский	31 445 176	31 516 844	31 801 943
Черемховский	3 210 097	3 411 661	3 392 948
Шелеховский	1 214 367	1 275 716	1 256 694

На рис. 15 видно, что в Ангарском, Иркутском, Усольском и Зиминском районах значения КЭГАЛ за исследуемый период варьируют, что связано с изменением объемов выбросов CO₂ от котлов тепловых электростанций и

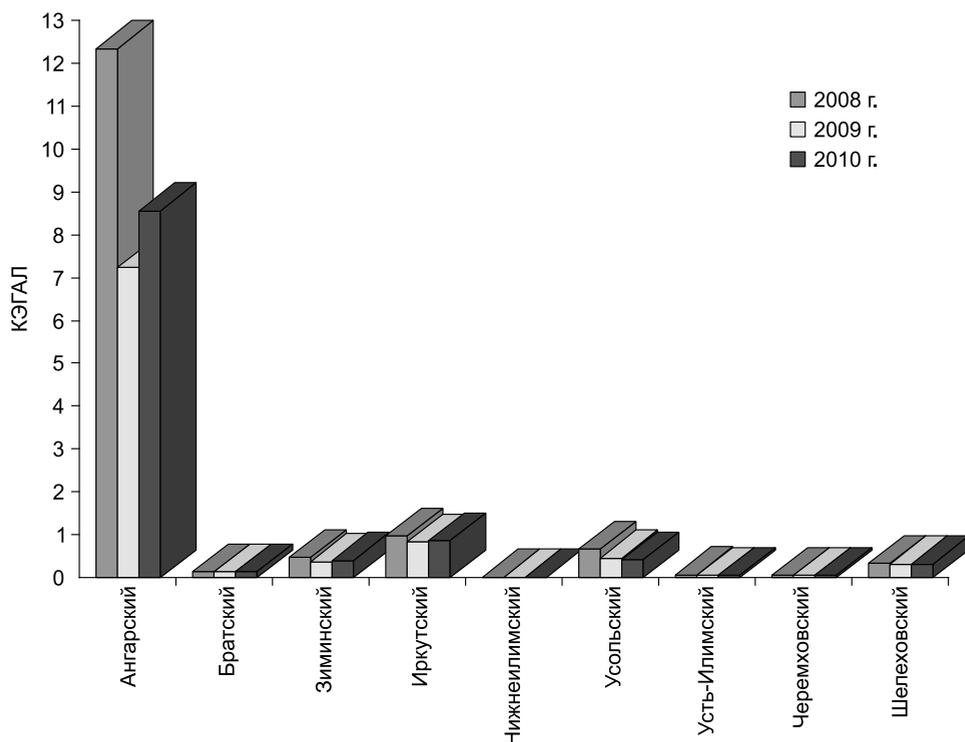


Рис. 15. Значения коэффициента эффективности газопоглодительной активности (КЭГАЛ) хвойных древостоев по районам Иркутской области, в которых сосредоточены предприятия ОАО "Иркутскэнерго".

котельных ОАО “Иркутскэнерго”. В остальных районах существенных колебаний коэффициента не отмечается. В восьми районах из девяти обследованных (Братский, Зиминский, Иркутский, Нижнеилимский, Усольский, Усть-Илимский, Черемховский, Шелеховский) значения КЭГАЛ изменяются от 0,01 до 0,97, т. е. в данных районах области хвойные древостои способны ассимилировать весь CO_2 , выделяемый в процессе сжигания топлива предприятия ОАО “Иркутскэнерго”.

И только в Ангарском районе коэффициент превысил единицу. В зависимости от года исследования (2008–2010 гг.) значения КЭГАЛ в районе изменялись от 7 до 12, что свидетельствует о неспособности хвойных древостоев полностью поглощать выделяемый предприятиями теплоэнергетики техногенный CO_2 . Это обусловлено не только высокими объемами выбросов углекислоты в атмосферу. Ангарский район – самое небольшое по региону муниципальное образование с площадью 1149 км², что в 10 раз меньше площади Иркутского района и в 30 раз меньше территории Братского района. Несмотря на то что доля покрытых лесной растительностью земель сопоставима с Братским и Усть-Илимским районами (около 90 % общей территории), хвойные древостои занимают половину лесной площади – всего 572 км². Это в основном сосновые древостои с удельной GPP [г/(га·год)] более низкой, чем у других хвойных. В то же время необходимо учитывать, что хотя листопадные древесные виды аккумулируют в своей фитомассе атмосферный углерод на меньший по сравнению с хвойными период времени (100–150 лет), их роль в вовлечении антропогенного углерода, в том числе от теплоэнергетического сектора, в биологические циклы существенна. Оценка газопоглодительной активности листопадных насаждений этого муниципального образования и выработка рекомендаций по изменению структуры его лесных массивов могут стать предметом дальнейшего изучения.

Важной функцией лесов в настоящее время считается регулирование газового состава атмосферы за счет связывания углекислоты в процессе фотосинтеза, аккумуляирования углерода в древесине и обогащения воздушного бассейна необходимым для жизни фотосинтетическим кислородом. По мнению А. Виноградова [1963], больше половины атмосферного кислорода вырабатывается лесами. Нами было определено количество фотосинтетически продуцируемого кислорода хвойными древостоями Иркутской области. В среднем (2008–2010 гг.) годовая продукция составляла $528 \cdot 10^6$ т O_2 . Было показано, что количество кислорода, выделяемого древостоями сосны, ели и лиственницы, изменяется в широких пределах в зависимости от гидротермических условий сезона вегетации. По административным районам области существенные колебания фотосинтетического кислорода обусловлены распределением хвойных древостоев.

По показателю обеспеченности кислородом населения Иркутской области была количественно оценена санитарно-гигиеническая функция хвойных древостоев. Кислород является важным компонентом поддержания жизнедеятельности. В организме человека как наиболее высокоорганизованной форме жизни функциональная способность жизненно важных орга-

нов существенно зависит от непосредственного снабжения их кислородом [Чарный, 1961].

Установлено, что хвойные древостои Иркутской области выделяют колоссальное количество необходимого для жизни людей кислорода. В засушливый вегетационный сезон данный показатель снижается вдвое в связи с ингибированием фотосинтетической продуктивности хвойных и увеличением дыхательной активности хвои.

Одной из экологических проблем современного периода является изменение климата на планете, которое связывают с избыточным накоплением в атмосферном воздухе парниковых газов. Основной вклад в общий выброс парниковых газов принадлежит CO₂, источником которого служит главным образом энергетический сектор.

Актуальность процессов, обуславливающих изменение климата на планете, еще в прошлом столетии была признана на межправительственном уровне и выразилась в заключении в 1992 г. Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а в 1997 г. – Киотского протокола к ней. И хотя основной сферой деятельности, регулируемой Киотским протоколом, являются промышленные эмиссии парниковых газов, он также рассматривает изменения источников и стоков парниковых газов в лесном и аграрном секторах, которые непосредственно связаны с деятельностью человека. Россия, присоединившись к Киотскому протоколу в 2005 г., тем самым взяла на себя обязательства принимать меры к уменьшению источников, увеличению стоков и сохранению резервуаров парниковых газов [Кокорин, 2004; Замолодчиков, 2005; Коровин, 2005; Курганова, 2010]. В связи с этим определение способности лесных экосистем бореальной зоны поглощать выбросы углекислого газа приобретает особую значимость.

В 2010 г. хвойные древостои на территории Иркутской области ассимилировали около 700 млн т диоксида углерода в год, что превышает объем выбросов CO₂ от теплоэнергетического сектора Иркутской области в 30 раз.

Коэффициент эффективности газопоглодительной активности лесов, рассчитанный для административных районов Иркутской области, был определен как отношение валового выброса диоксида углерода от муниципальных котельных и предприятий ОАО “Иркутскэнерго” к фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев за 2010 г. Показано, что в Ангарском и Иркутском районах наблюдается превышение техногенных выбросов CO₂ над ассимиляционными возможностями хвойных древостоев в 8,57 и 1,07 раза соответственно. Следовательно, можно констатировать, что в данных районах необходимо увеличение площади лесных насаждений для биологической фиксации выбросов углекислого газа. В остальных 26 районах Иркутской области значение коэффициента эффективности меньше единицы, т. е. хвойные древостои способны ассимилировать в процессе фотосинтеза весь CO₂, поступающий в воздушный бассейн данных районов в составе выбросов энергетического сектора.

Эффективность газопоглодительной активности лесов была отдельно оценена по данным предприятий ОАО “Иркутскэнерго”, являющегося основ-

ным потребителем первичных топливных ресурсов региона. Установлено, что в Ангарском районе только 8–12 % выбросов CO_2 могут быть поглощены хвойными древостоями в процессе фотосинтеза. Напротив, в остальных восьми районах, в которых находятся предприятия ОАО “Иркутскэнерго”, ассимилирующие возможности хвойных древостоев превосходят объемы выбросов CO_2 в несколько раз.

Таким образом, определенные нами величины продуцируемого в процессе фотосинтеза кислорода и значения коэффициента эффективности газопоглодительной (CO_2 -поглодительной) активности хвойных древостоев являются количественными оценками санитарно-гигиенического состояния и оздоровительного потенциала территории Иркутской области. Данные оценки могут быть использованы при решении локальных экологических проблем и учитываться как критерии успешности проведения комплекса природоохранных и лесохозяйственных мероприятий, способствующих стабилизации газового состава атмосферы, выравниванию дисбаланса техногенный/фотосинтетический CO_2 и повышению защитной функции лесных насаждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поглощая в процессе фотосинтеза диоксид углерода и выделяя кислород, лесные экосистемы бореальной зоны выполняют важную стабилизирующую функцию состояния биосферы. В то же время пулы и потоки углерода в экосистемах существенно зависят от климатических факторов и видового состава древесной растительности. С этой точки зрения представляется весьма актуальным оценить формирующиеся в течение года потоки и пулы углерода и их погодно-климатическую динамику в лесных экосистемах регионального масштаба. Другим не менее важным моментом является адекватная оценка способности растительных экосистем “утилизировать” в процессе фотосинтеза техногенные потоки CO_2 , а также за счет выделения кислорода в процессе фотосинтеза создавать благоприятные санитарно-гигиенические условия для проживания населения.

Хвойные древостои Иркутского региона характеризуются высоким уровнем фотосинтетического поглощения углерода. На основе эколого-физиологических экспериментальных данных нами показано, что брутто-продукция хвойных древостоев обладает высокой степенью изменчивости. Выявлены региональные климатические факторы, определяющие динамику потоков углерода в течение вегетации. Наибольшие изменения фотосинтетической продуктивности обусловлены динамикой температуры почвы и освещенности в ранневесенний и осенний периоды вегетации. В условиях летнего сезона фотосинтетическая продуктивность определяется уровнем благоприятного почвенного увлажнения.

Количественно охарактеризован фотосинтетический поток углерода в хвойные древостои области и определена его динамика в зависимости от условий вегетации – от 406,7 до 756,8 млн т CO_2 в год. Наиболее продуктивными являются хвойные древостои северных и центральных районов области. Высокой удельной фотосинтетической продуктивностью CO_2 характеризуются лиственничные (26,00–31,95 т/га) и еловые (23,74–28,63 т/га) древостои, наименьшей – сосновые (11,45–12,89 т/га). Эти различия обусловлены видоспецифическими особенностями фотосинтеза хвойных и массой хвои, приходящейся на единицу площади древостоев.

Дана характеристика стока углерода в хвойные древостои. Средняя удельная величина первичной нетто-продукции С хвойных древостоев Ир-

кутской области составляет 2,71 т/(га·год). В экстремально засушливых условиях вегетации нетто-продукция снижается в 1,6 раза. Полученные данные необходимо учитывать при прогнозных оценках динамики нетто-продукции хвойных древостоев больших территорий в экстремальных климатических условиях.

Выявлены высокие показатели санитарно-гигиенической функции лесов региона. Средняя годовая продукция фотосинтетического кислорода хвойных древостоев Иркутской области составляет 528 млн т O_2 . В засушливый вегетационный сезон продукция O_2 снижается в 1,8 раза. Объем продуцируемого кислорода в расчете на одного жителя Иркутской области в благоприятный по условиям увлажнения год изменяется в пределах $138,3 \cdot 10^6$ – $150,4 \cdot 10^6$ л, что по медицинским показаниям может обеспечивать жизнедеятельность одного человека в состоянии покоя более чем на 1000 лет, а при выполнении тяжелой работы – на 100 лет.

Для оценки CO_2 -поглощительной активности хвойных лесов разработан коэффициент, позволяющий оценивать соотношение техногенных выбросов CO_2 и ассимиляционных возможностей хвойных древостоев. Показано, что в целом на территории Иркутской области газопоглощительная способность хвойных древостоев превышает объем выбросов углекислого газа от теплоэнергетического сектора на 97 %. В то же время в наиболее индустриально развитых (Ангарский, Иркутский) районах фотосинтетическое поглощение хвойных древостоев в 1,07 и 8,57 раза ниже объемов техногенных выбросов CO_2 за счет доминирования урбанизированных и сельскохозяйственных территорий.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют, что хвойные леса Иркутского региона обладают высоким уровнем фотосинтетической активности и вносят большой вклад в регуляцию региональных потоков атмосферного углерода. Они обеспечивают высокий уровень стока углерода в виде чистой первичной продукции, высокую производительность и стабильность предприятий лесного сектора в экономике области. Наряду с этим при интенсивном продуцировании фотосинтетического кислорода и большой CO_2 -поглощительной способности хвойные леса создают благоприятные санитарно-гигиенические условия для проживания населения области.

ЛИТЕРАТУРА

Абалаков А.Д., Кузьмин С.Б. Геоинформационное обеспечение и картографирование экологического риска // Геодезия и картография. 1997. № 11. С. 39–46.

Алексеев В.В., Куракина Н.И., Орлова Н.В. Геоинформационная система мониторинга водных объектов и нормирования экологической нагрузки // ArcReview. 2006. № 1 (36). С. 9.

Алексеев В.Н., Берси Р.А. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ИЛ СО РАН, 1994. 218 с.

Атлас. Иркутская область (экологические условия развития). М.; Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2004. 90 с.

Атнабаев А.Ф., Бахтизин Р.Н., Нагаев Р.З. и др. ГИС-модели для анализа последствий аварийных разливов нефти // ArcReview. 2006. № 1 (32). С. 18.

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С. и др. Карта лесов Российской Федерации, окрашенная по преобладающим группам пород деревьев и сомкнутости древесного полога. М-б 1:14 000 000. М., 2004.

Бейчук О., Парахин С., Терентьева Л. Моделирование шумового загрязнения города // ArcReview. 2006. № 3 (38). URL: http://dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1574&SECTION_ID=43&print=Y (дата обращения: 23.11.10).

Берлянт А.М., Жалковский Е.А. К концепции развития ГИС в России. Картографирование телекоммуникационных сетей России // ГИС-обозрение. 2005. Весна. С. 7–11.

Бобкова К.С. Отчет по анализу углеродного цикла и методам изоляции углерода. Сыктывкар, 2004. URL: www.undp-komi.org/pdf/7_A.pdf (дата обращения: 23.11.10).

Болондинский В.К. Динамика CO₂-газообмена побегов сосны обыкновенной в условиях среднетаежной зоны: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2004. 28 с.

Болондинский В.К. Устьичная регуляция фотосинтеза у сосны обыкновенной // Материалы Всерос. конф. Ч. 6: Экологическая физиология и биохимия растений. Интродукция растений. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 15–17.

Болондинский В.К. Исследование зависимости фотосинтеза от интенсивности солнечной радиации, температуры и влажности воздуха у растений карельской березы и березы повислой // Тр. КарНЦ РАН. 2010. № 2. С. 3–9.

Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В. и др. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. журн. 2005. № 4. С. 631–649.

Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 200 с.

Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. Влияние эколого-морфологических факторов на устьичное сопротивление ели европейской // Лесоведение. 1993. № 3. С. 48–60.

Васильев О.Ф., Ковалевская Н.М. Сохранение водно-болотных угодий и их обитателей на юге Западной Сибири // ArcReview. 2005. № 3 (34). С. 10.

Ващук Л.Н., Попов Л.В., Красный Н.М. и др. Леса и лесное хозяйство Иркутской области. Иркутск, 1997. 288 с.

Ващук Л.Н., Швиденко А.З. Динамика лесных пространств Иркутской области. Иркутск: Иркут. обл. тип. № 1, 2006. 392 с.

Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В., Бескоровайная И.Н. и др. Органическое вещество почв лиственничников северной тайги // Почвоведение. 2002. № 8. С. 967–974.

Взаимодействие картографии и геоинформатики / Под ред. А.М. Берлянта, О.Р. Мусина. М.: Науч. мир, 2000. 192 с.

Виноградов А. Технический прогресс и защита биосферы // Коммунист. 1963. № 11. С. 17–31.

Винокуров М.А., Суходолов А.П. Экономика Иркутской области: В 4 т. Иркутск: Изд-во БГУПЭ, 1998. Т. 1. 203 с.

Вознесенский В.Л. Фотосинтез пустынных растений. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 256 с.

Воронин П.Ю., Кайбияйнен Л.К., Болондинский В.К. и др. Хлорофилльный индекс и формирование первичной продуктивности средневозрастного соснового (*Pinus sylvestris* L.) древостоя // Пробл. регион. экологии. 2000. № 6. С. 5–17.

Воронова Н.В., Конюхов Ю.В., Казимирко С.И. и др. Изменения состояния фотосинтетического аппарата диатомовой водоросли *Thalassiosira weissflogii* при фотоадаптации и фотоповреждении // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 6. С. 836–843.

Гармаш Е.В., Головки Т.К. CO₂-газообмен и рост *Rhaponticum carthamoides* в условиях подзоны средней тайги европейского северо-востока. Зависимость фотосинтеза и дыхания от внешних факторов // Физиология растений. 1997. Т. 44, № 6. С. 854–863.

Германова Н.И., Саковец В.И., Матюшкин В.А. Экологические последствия лесосушения в Карелии // Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика. Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2006. С. 100–102.

Гитарский М.Л., Замолотчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Карабань Р.Т. Эмиссия и поглощение парниковых газов в лесах России в связи с выполнением обязательств по климатической конвенции ООН // Лесоведение. 2006. № 6. С. 34–44.

Головки Т.К. Дыхание растений (физиологические аспекты). СПб.: Наука. С.-Петербург. отд-ние, 1999. 204 с.

Голомазова Г.М. Оптимальные условия фотосинтеза лиственницы сибирской // Физиолого-биохимические процессы у хвойных растений. Красноярск, 1978. С. 24–34.

Голомазова Г.М. Влияние внешних факторов на фотосинтез хвойных. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. 120 с.

Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Модельные оценки влияния изменения климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России // Изв. РАН. Сер. биол. 2007. № 2. С. 212–228.

Гончаров В.М. Применение ГИС-технологий при агрофизической оценке территории // Вестн. ОГУ. 2010. № 6 (112). С. 107–112.

Горшков В.Г., Макарьева А.В. Изменение глобального круговорота углерода: результаты анализа измерений отношений O_2/N_2 в атмосфере и парциального давления CO_2 у поверхности раздела океан-атмосфера // Геохимия. 2002. № 5. С. 526–535.

Горышина Т.К. Фотосинтетический аппарат растений в условиях среды. М.: Наука, 1989. 204 с.

Горюнова В., Илюхина Ю. Создание эколого-токсикологического атласа Каспийского моря // ArcReview. 2004. № 1 (28). С. 18.

Гостева А.А., Ерунова М.Г. Геоинформационный анализ уровня загрязнения лесных экосистем в заповеднике “Столбы” // Лесоведение. 2006. № 6. С. 66–75.

Государственный доклад “О состоянии окружающей среды Иркутской области в 2000 году” / Под ред. Л.А. Кром. Иркутск: Облмашинформ, 2001. 384 с.

Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2010 году”. Иркутск, 2011. 199 с.

Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2011 году”. Иркутск: Форвард, 2012. 400 с.

Гохман В., Андриянов В. Что такое ГИС и как с ними... подружиться // САПР и графика. 2000. № 5. URL: www.dataplus.ru (дата обращения: 07.03.05).

Григорьев А., Зайцев В. ДДЗ+ERDAS – тенденция экологического мониторинга // ArcReview. 2003. № 3 (26). С. 23.

Грошев Б.И., Синицын С.Г., Мороз П.И., Сеперович И.П. Лесотаксационный справочник. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 288 с.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Мониторинг климата и оценка климатической изменчивости по данным наблюдений // Глобальные изменения климата и их последствия для России. М.: РООУППГ, 2002. С. 9–39.

Гулев С.К., Катцов В.М., Соломин О.Н. Глобальное потепление продолжается // Вестн. РАН. 2008. Т. 78, № 1. С. 20–27.

Дадыкин В.П. Особенности поведения растений на холодных почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 276 с.

Дадыкин В.П. Использование света древесными породами в зависимости от внешних условий, 1960 // Попов Л.В. Южнотаежные леса Средней Сибири. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982. С. 52–60.

Дальке И.В., Головки Т.К. Оптимальная температура и освещенность для фотосинтеза толстянковых на Севере (на примере *Rhodiola Rosea* L.) // Вестн. Башк. ун-та. 2001. № 2 (1). С. 29–31.

Данченко А.М., Williams R., Данченко М.А., Мельник С.А., Nicodemus M. Содержание углерода у древесных видов на юге штата Огайо и Томской области // Междунар. науч.-практ. конф. “Развитие научно-технического сотрудничества российских научных и научно-образовательных центров с учеными-соотечественниками, работающими за рубежом”. Томск, 2010. С. 31–36.

ДеМерс, Майкл Н. Географические информационные системы: Пер. с англ. М.: Дата+, 1999. 490 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2007 год. М.: НИУ Росгидромета, 2008. 35 с.

Дроздов С.Н., Курец В.К., Попов Э.Г. и др. Влияние температуры на CO_2 -газообмен растений // Вестн. Башк. ун-та. 2001. № 2 (1). С. 33–34.

Дротииков М.А., Дедков В.П., Напреенко М.Г. Внедрение открытых геоинформационных технологий в методику экологического планирования // Вестн. Рос. гос. ун-та им. И. Канта. 2010. Вып. 7. С. 146–151.

ЕМИСС (Единая межведомственная информационная система) – Лесистость территории (процент). 2013а. URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=38193&referrerType=1&referrerId=946986> (дата обращения: 10.04.15).

ЕМИСС (Единая межведомственная информационная система) – Лесные площади. 2013б. URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=38196&referrerType=1&referrerId=946986> (дата обращения: 10.04.15).

ЕМИСС (Единая межведомственная информационная система) – Лесные земли. 2013в. URL: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=38194&referrerType=0&referrerId=946986> (дата обращения: 10.04.15).

Ермолаев О.П., Мальцев К.А. Оценка эрозионного риска для почвенного покрова лесных и лесостепных ландшафтов Среднего Поволжья средствами ГИС-технологий // Учен. записки Казан. ун-та. 2008. Т. 150, кн. 4. С. 85–97.

Ершов Ю.И. Органическое вещество биосферы и почвы. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 2004. 104 с.

Журавлева И.В., Сорокин А.С. Возможности представления и анализа информации Красной книги Тверской области с использованием Arcview GIS // Материалы науч. конф. студентов и аспирантов. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2004. С. 90.

Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Фотосинтетическая активность кроны сосны обыкновенной // Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима растений в полевых условиях. Иркутск, 1982. С. 44–51.

Заварзин Г.А. Международные экологические конвенции // Природа. 1992. № 12. С. 3–9.

Загирова С.В. Структура ассимиляционного аппарата и CO₂-газообмен у хвойных. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 108 с.

Замай С.С., Якубайлик О.Э. Программное обеспечение и технологии геоинформационных систем. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 112 с.

Замолодчиков Д.Г. Баланс углерода в тундровых и лесных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2003. 56 с.

Замолодчиков Д.Г. Леса и сельскохозяйственные земли России в аспекте климатических изменений: тенденции развития и потенциал климатических акций // Семинар “Роль механизмов Киотского протокола в развитии лесо- и землепользования в России”. М., 2005. 25 с.

Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Геоинформационный подход к изучению углеродных потоков в тундровых ландшафтах // Криосфера Земли. 1997а. Т. 1, № 4. С. 79–84.

Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Углеродный баланс биогеоценозов тундровой зоны России // Углерод в биогеоценозах: Докл. XV ежегодных чтений памяти акад. В.Н. Сукачева. М., 1997б. С. 708–709.

Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений // Лесоведение. 2000. № 6. С. 54–63.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н., Честных О.В. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России // *Экология*. 2005. № 5. С. 323–333.

Зейлер М. Моделирование нашего мира: Руководство ESRI по проектированию базы геоданных: Пер. с англ. М.: Дата+, 1999. 251 с.

Зотикова А.П., Воробьева Н.А., Соболевская Ю.С. Динамика содержания и роль каротиноидов хвои кедрового сибирского в высокогорье // *Вестн. Башк. ун-та*. 2001. № 2 (II). С. 67–69.

Изменения климата в 2001 г. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М., 2002. URL: www.climatechange.igse.ru (дата обращения: 03.05.09).

Исаев А.С., Коровин Г.Н. Углерод в лесах Северной Евразии. Круговорот углерода на территории России // *Избр. тр. по проблеме: Глобальная эволюция биосферы. Антропогенный вклад*. М., 1999. С. 63–95.

Исаев А.С., Коровин Г.Н. Крупномасштабные исследования в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // *Лесоведение*. 2003. № 2. С. 3–9.

Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И. и др. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // *Лесоведение*. 1993. № 5. С. 3–10.

Карелин Д.В., Гильманов Т.Г., Замолодчиков Д.Г. К оценке запасов углерода в наземных экосистемах тундровой и лесотундровой зон Российского Севера: фитомасса и первичная продукция // *Докл. РАН*. 1994. Т. 335, № 4. С. 530–532.

Кашапов Р.Ш., Кулагин А.А. Опыт оценки стока атмосферного углерода в Башкортостане (РБ) // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. 2008. Т. 10, № 2. С. 298–302.

Квашина А. Мониторинг природных комплексов в заповеднике “Денежкин Камень” // *ArcReview*. 2004. № 4 (31). С. 3.

Киприн В.И. Схема многоканальной установки с ИК-газоанализатором для исследования фотосинтеза и дыхания растений // *С.-х. биология*. 1972. Т. 7. С. 285–290.

Ковалев А.Г., Антипова О.В. Влияние интенсивности света на анатомо-морфологическое строение хвои сосны // *Лесоведение*. 1983. № 1. С. 29–34.

Кокорин А.О. Анализ и экспериментальная оценка параметров прироста бореальных лесов при потеплении // *Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем*. 1996. № 16. С. 72–85.

Кокорин А.О. Вклад российских лесов в мировой баланс углерода и задачи лесной отрасли после ратификации Киотского протокола // *Устойчивое лесопользование*. 2004. № 4 (6). С. 16–20.

Кокорин А.О. Изменение климата: Обзор состояния научных знаний об антропогенном изменении климата. М.: РРЭЦ, 2005. 20 с.

Колесниченко В.Т. Влияние удобрений на урожай и качество зерна озимой пшеницы “Заларинка” в Иркутской области (результаты полевых опытов). М.: НПК “Промбезопасность”, 2004. 256 с.

Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Цена экологических услуг России // *Вестн. РАН*. 2003. Т. 73, № 1. С. 3–13.

Коппель А. Экологический анализ энергообмена кроны ели европейской: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тарту, 1981. 20 с.

Коровин Г.Н. Проблемы реализации Киотского протокола в Российском лесном секторе // Роль механизмов Киотского протокола в развитии лесо- и землепользования в России: Семинар. М., 2005. 24 с.

Коропачинский И.Ю. Древесные растения Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 382 с.

Крамер П., Козловский Т. Физиология древесных растений. М.: Гослесбумиздат, 1963. 626 с.

Кудеяров В.Н. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33–42.

Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. и др. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.

Куракина Н.И., Емельянова В.Н., Коробейников С.А., Никанорова Е.С. Пространственное моделирование загрязнения водных объектов // ArcReview. 2006. № 1 (36). С. 12.

Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2010. 50 с.

Курец В.К., Марковская Е.Ф., Попов Э.Г. и др. Моделирование газообмена дикорастущих растений // Эколого-физиологические исследования фотосинтеза и водного режима растений в полевых условиях. Иркутск, 1983. С. 154–159.

Ладанова Н.В., Тужилкина В.В. Структурная организация и фотосинтетическая активность хвои ели сибирской. Сыктывкар: Кн. изд-во, 1992. 100 с.

Лонг С.П., Холлгрэн Д.Е. Измерение ассимиляции CO₂ растениями в полевых и лабораторных условиях. Фотосинтез и биопродуктивность: методы определения / Под ред. А.Т. Мокроносова. М.: Агропромиздат, 1989. С. 115–165.

Мазуркин П.М., Фадеев А.Н. Геоинформационные системы земельного кадастра, лесного реестра и особо охраняемых территорий // Современ. пробл. науки и образования. 2009. № 4. С. 69–75.

Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 265 с.

Медведев В.В., Булыгин С.Ю., Лактионова Т.Н., Деревянко Р.Г. Критерии оценки пригодности земель Украины для возделывания зерновых культур // Почвоведение. 2002. № 2. С. 216–227.

Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час: утв. Госкомэкологии России от 09.07.1999. URL: www.standardartov.ru/norma_doc/7/7042/index.htm (дата обращения: 09.06.09).

Методические указания по расчету валового выброса двуоксида углерода в атмосферу из котлов тепловых электростанций и котельных: РД 153-34.0-02.318-2001: утв. Департаментом научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России" от 17.02.2001. URL: www.docload.ru/Basesdoc/11/11890/index.htm (дата обращения: 09.06.09).

Мещерская А.В., Обязов В.А., Богданова Э.Г. и др. Изменения климата Забайкалья во второй половине XX века по данным наблюдений и ожидаемые его изменения в первой четверти XXI века // Тр. ГГО. 2009. Вып. 559. С. 32–57.

Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Игнатьева О.В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. 134 с.

Михайлова Т.А., Тараненко Е.Н., Рудиковский А.В., Горшков А.Г. Влияние аэрозольных полициклических ароматических углеводородов на хвойные деревья в модельных опытах // Лесоведение. 2015. № 1. С. 36–43.

Моисеев Б.Н., Алябина И.О. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 1–12.

Мокроносов А.Т. Онтогенетический аспект фотосинтеза. М.: Наука, 1981. 196 с.

Молдау Х.А. Устьица – универсальные регуляторы фотосинтеза // Физиология растений. 1977. Т. 24, № 5. С. 969–975.

Молнар М.С., Куракина Н.И. Система контроля и управления качеством воды с использованием геоинформационных технологий // Информационные технологии как основа управления в сфере природопользования и охраны окружающей среды. СПб., 2007. С. 25–28.

Молчанов А.Г. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев. М.: Наука, 1983. 136 с.

Молчанов А.Г. Соотношение фотосинтеза и транспирации у сосны обыкновенной в условиях южной тайги // Лесоведение. 1986. № 4. С. 76–82.

Молчанов А.Г. Изменчивость интенсивности фотосинтеза дуба черешчатого от факторов окружающей среды // Лесоведение. 2002. № 6. С. 13–22.

Молчанов А.Г. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.

Молчанов А.Г., Татаринова Ф.А. Изменчивость световых кривых фотосинтеза в пределах кроны ели // Лесоведение. 1993. № 3. С. 61–70.

Мутыгуллина Ю.Р. Динамика содержания и роль пигментов фотосинтеза у видов рода *Dianthus* L. флоры Предкавказья // Вестн. МГОУ. Сер. Естеств. науки. 2009. № 1. С. 52–55.

Мухин В.А., Воронин П.Ю. Компоненты CO₂-газообмена таежного древостоя в широтной трансекте Западной Сибири // Материалы докл. Междунар. конф.: В 3 ч. Ч. 3. Современная физиология растений: от молекул до экосистем. Сыктывкар, 2007. С. 67–68.

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2008 гг. Ч. 1. М., 2010. 329 с.

Национальный доклад по проблемам изменения климата. М., 2002. 29 с.

Нестерович Н.Д., Дерюгина Т.Ф., Лучков А.И. Структурные особенности листьев хвойных. Минск: Наука и техника, 1986. 143 с.

Нильссон С. Естественные леса мира – вызов третьему тысячелетию // Деятельные леса мира и их роль в глобальных процессах: Тез. конф. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1999. С. 32–33.

Нильссон С., Ваганов Е.А., Швиденко А.З. и др. Углеродный бюджет растительных экосистем России // Докл. РАН. 2003. Т. 393, № 4. С. 541–543.

Одум Ю. Основы экологии. М.: Прогресс, 1975. 740 с.

Орлова Н.В., Ковалева М.И. Донные отложения при оценке природных объектов // Информационные технологии как основа управления в сфере природопользования и охраны окружающей среды. СПб., 2007. С. 38–40.

Орт Д., Меландри Б.А., Юнге В. Фотосинтез: В 2 т. Пер. с англ. / Под ред. Говинджи. М.: Мир, 1987. Т. 2. 460 с.

Оскорбина М.В. Структурные и функциональные особенности фотосинтетического аппарата хвойных в условиях Верхнего Приангарья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2010. 18 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2008. Т. 1–2. URL: <http://www.meteor.ru> (дата обращения: 12.05.09).

Паспорт жилищно-коммунального хозяйства Иркутской области по состоянию на 01.01.2011 г.: В 2 т. Подготовлено областным государственным казенным учреждением “Аналитическая оперативно-диспетчерская служба жилищно-коммунального хозяйства Иркутской области”, 2011. 433 с.

Петина М.А. Использование геоинформационных технологий в системах поддержки решений при управлении водными ресурсами (на примере Белгородской области) // Науч. ведомости. 2010. № 21 (92), вып. 13. С. 150–156.

Плешиков Ф.И., Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф. и др. Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 2002. 356 с.

Побединский А.В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья. М.: Наука, 1965. 268 с.

Поварницын В.А. Типы лесов сибирской лиственницы СССР // Сиб. лесотехн. ин-т: Сб. тр. Л.: Гослестехиздат, 1941. С. 17–51.

Подколзин О.А., Пилипенко Г.Л., Бурлай А.В., Пилипенко Л.В. Исследование методов использования ГИС-технологий при эколого-агрохимическом мониторинге сельскохозяйственных земель в Ставропольском крае // Пробл. агрохимии и экологии. 2009. № 4. С. 48–53.

Полушина Е.В. Применение ГИС-технологий для выработки стратегии рационального использования почвенного покрова засоленных территорий юга Западной Сибири // Экология в современном мире: взгляд научной молодежи: Материалы Всерос. конф. молодых ученых. Улан-Удэ: Изд-во ГУЗ РЦМП МЗ РБ, 2007. С. 300–301.

Помазкина Л.В. Интегральная оценка влияния техногенного загрязнения и климатических факторов на агроэкосистемы Байкальской природной территории // Успехи соврем. биологии. 2011. Т. 131, № 2. С. 193–202.

Помазкина Л.В., Зорина С.Ю., Котова Л.Г., Тихонов А.Ю. Эмиссия CO₂ в атмосферу в агроэкосистемах Иркутской области // Пробл. регион. экологии. 2008а. № 1. С. 53–57.

Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Зорина С.Ю. и др. Влияние свойств пахотных почв и их загрязнения фторидами на эмиссию CO₂ // Почвоведение. 2008б. № 2. С. 227–234.

Помазкина Л.В., Соколова Л.Г., Звягинцева Е.Н. Потоки и баланс углерода в агроэкосистемах на агросерых почвах лесостепи Прибайкалья // Почвоведение. 2013. № 6. С. 1–11.

Попов Л.В. Леса междуречья Чуны и Вихоревой // Тр. ВСФ СО АН СССР. Сер. биол. 1961. Вып. 39. 142 с.

Попов Л.В. Южнотаежные леса Средней Сибири. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982. С. 52–60.

Попов Э.Г., Холопцева Е.С., Дроздов С.Н., Коломейченко В.В. Влияние света и температуры на нетто-фотосинтез ряда сортов клевера лугового // Материалы докл. Междунар. конф.: В 3 ч. Ч. 3. Современная физиология растений: от молекул до экосистем. Сыктывкар, 2007. С. 25–27.

Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 176 с.

Пригоряну О.М., Киселева Л.Л. Территориальное планирование охраны природы региона с использованием ГИС-технологий (на примере Орловской области) // Учен. записки. 2008. № 2. С. 233–239.

Пузаченко М.Ю., Черненко Т.В. ГИС-технологии в мониторинге биоразнообразия лесов // ArcReview. 2006. № 4 (39).

Пятое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М., 2010. 196 с.

Растительность юга Восточной Сибири [карта]. М-б 1:1 500 000 / Под ред. А.В. Белова. М.: ГУГК, 1983. 4 л.

Ризаев И.С., Сапаркин П.В., Рахал Я. Инструментальные средства хранения и обработки пространственных данных // Educational Technol. and Soc. 2008. N 11 (3). P. 426–435.

Рогова Т.В., Прохоров Т.В., Шайхутдинова Г.В., Шагиев Б.Р. Электронные базы фитоиндикационных данных в системах оценки состояния природных экосистем и ведения кадастров биоразнообразия // Учен. записки Казан. ун-та. 2010. Т. 152, кн. 1. С. 174–184.

Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.

Розов А.В., Шпильман А.В., Полищук И.Н. и др. Система мониторинга недропользования // ArcReview. 2006. № 4 (39).

Ротанова И.Н., Ведухина В.Г., Цимбалей Ю.М. Водно-экологическое картографирование на основе ГИС-технологий // Мир науки, культуры, образования. 2009. № 2 (14). С. 23–26.

Семихатова О.А. Энергетика дыхания растений в норме и при экологическом стрессе. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 72 с.

Семихатова О.А. Эколого-физиологические исследования темного дыхания растений: прошлое, настоящее и будущее // Бот. журн. 2000. Т. 85. С. 15–32.

Семихатова О.А., Николаева М.Г. Дыхательная способность высших растений. Таксономический обзор // Физиология растений. 1996. Т. 43, № 3. С. 450–461.

Слемнев Н.Н. Особенности фотосинтетической деятельности растений Монголии: эволюционные, экологические и фитоценоотические аспекты // Там же. С. 418–436.

Смирнов А.В. Леса Иркутской области // Леса СССР. Т. 4. Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 350–387.

Степанов Г.М. Температурный режим мерзлотных почв на горах северной Якутии // Лесоведение. 1988. № 5. С. 67–71.

Суворова Г.Г. Фотосинтез и рост хвойных лесостепного Предбайкалья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 1992. 19 с.

Суворова Г.Г. Фотосинтетическая активность хвойных деревьев в условиях юга Средней Сибири: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Иркутск, 2006. 38 с.

Суворова Г.Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири. Новосибирск: Акад. изд-во "Гео", 2009. 195 с.

Суворова Г.Г., Деловеров А.Т., Оскорбина М.В., Попова Е.В. Использование ГИС-технологий в построении карт фотосинтеза хвойных на больших территориях // Успехи соврем. биологии. 2010. Т. 130, № 3. С. 275–285.

Сухих В.И. Лесной растительный покров Земли в прошлом, настоящем и будущем // Глобальные экологические проблемы XXI века: Материалы науч. конф., посвященной 85-летию акад. А.Л. Яншина. М.: Наука, 1998. С. 136–155.

Тарабукина И.Г., Саввинов Д.Д. Влияние пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 211 с.

Татаринов В. Оценка загрязнения окружающей среды в районе города Карабаша // ArcReview. 2005. № 3 (34). С. 17.

Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. В.Н. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. 296 с.

Титлянова А.А. Биологический круговорот углерода в травяных биогеоценозах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 221 с.

Титова Е.Л. Планирование мер по предупреждению аварийного загрязнения нефтепродуктами акватории р. Невы и Финского залива. Электронная система планирования мер по предупреждению загрязнения (CPS) // ArcReview. 2003. № 3 (26). С. 19.

Тихомиров Б.А., Коропачинский И.Ю., Фалалеев Э.Н. Лиственничные леса Сибири и Дальнего Востока. Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 164 с.

Третье национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Межведомственная комиссия Российской Федерации по проблемам изменения климата. М., 2002. 123 с.

Трефилова О.В. Интенсивность гетеротрофного дыхания в сосняках средней тайги: сравнительный анализ методов оценки // Хвойные бореальной зоны. 2007. № 4–5. С. 467–473.

Трифонов Т.А., Мищенко Н.В., Краснощеков А.Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М.: УМО РФ, 2005. 349 с.

Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П. Хлорофилльный индекс и ежегодный фотосинтетический сток углерода в хвойные фитоценозы на европейском севере России // Физиология растений. 1988. Т. 45, № 4. С. 594–600.

Указания по заполнению в формах государственной статистической отчетности по статистике топливно-энергетического комплекса показателя о расходе топлива в условных единицах измерения: утв. Постановлением Национального статистического комитета Республики Беларусь от 29.07.2009а.

Указания по заполнению форм федерального статистического наблюдения № 11-ТЭР "Сведения об использовании топлива, теплоэнергии и электроэнергии на производство отдельных видов продукции, работ (услуг)" и Приложение к форме № 11-ТЭР "Сведения об образовании и использовании вторичных энергетических ресурсов": утв. Приказом Росстата от 20.07.2009б.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 706 с.

Усольцев В.А., Часовских В.П., Воронов М.П. и др. Оценка углерододепонирующей способности лесов: от пробной площади – к автоматизированной системе пространственного анализа // Лесн. таксация и лесоустройство. 2008. № 1 (39). С. 183–190.

Уткин А.И. Леса центральной Якутии. М.: Наука, 1965. 207 с.

Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов. (Методы изучения и результаты) // Лесоведение и лесоводство. 1975. Т. 1. С. 9–190.

Уткин А.И. Некоторые особенности распространения корневых систем древесных пород на холодных почвах, 1958 // Попов Л.В. Южнотаежные леса Средней Сибири. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982. 330 с.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. и др. Леса России как резервуар органического углерода в биосфере // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Пряжников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.

Уткин А.И., Исаев А.С. Низовые пожары в лиственничных лесах Восточной Сибири и их влияние на состояние древостоев // Лиственница. 1962. Т. 2. С. 60–69.

Федоров Б.Г. Экономико-экологические аспекты выбросов углекислого газа в атмосферу // Пробл. прогнозирования. 2004. № 5. С. 86–101.

Федоровский Д.В. Определение водных и физических свойств почвы при проведении вегетационных опытов // Агрехимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. С. 296–330.

Физиология фотосинтеза / Под ред. А.А. Ничипоровича. М.: Наука, 1982. 320 с.

Филиппова А.К., Осколков В.А., Янькова Л.С. и др. Влияние факторов среды на фотосинтез и содержание пигментов в условиях засухи и оптимального увлажнения у лиственницы сибирской // Материалы Всерос. конф. “Природная и антропогенная динамика наземных экосистем”. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. С. 63–66.

Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н. Вклад лесов России в углеродный баланс планеты // Лесохоз. информация. 2003. № 1. С. 27–34.

Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н. Динамика лесного фонда и лесов, не входящих в лесной фонд Российской Федерации // Лесохоз. информация. 2004. № 3. С. 35–52.

Фомин В., Шавнин С. Рост сосновых древостоев в горной местности с высоким уровнем загрязнения атмосферы промышленными выбросами // ArcReview. 2004. № 4 (31). С. 7.

Форма 1.9. Распределение площади лесов и запасов древесины по преобладающим породам и группам возраста. По состоянию на 1 января 2011 г. Иркутск: Агентство лесн. хоз-ва Иркутской области, 2011.

Функционирование и развитие электроэнергетики РФ в 2005 году. URL: <http://www.e-arbe.ru/analytical/doclad2005/> (дата обращения: 12.05.09).

Фураев В.В. Лесные пожары как экологический фактор формирования тайги // Проблемы лесоведения Сибири. М.: Наука, 1977. С. 136–147.

Хортонен А.А. Географические информационные системы как класс систем поддержки принятия решений при управлении пространственной информации // Вестн. АГТУ. Сер. Управление, вычислит. техника и информатика. 2001. № 1. С. 195–199.

Цветков В.Ф., Сурина Е.А. Запасы углерода в лесах Архангельской области // Лесн. журн. 2003. № 5. С. 17–25.

Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 288 с.

Цельникер Ю.Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. М.: Наука, 1978. 211 с.

Цельникер Ю.Л., Малкина И.С., Ковалев А.Г. и др. Рост и газообмен CO₂ у лесных деревьев. М.: Наука, 1993. 256 с.

Цельникер Ю.Л., Малкина И.С. Хлорофилльный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоем леса // Физиология растений. 1994. Вып. 41, № 2. С. 225–230.

Цельникер Ю.Л., Молчанов А.Г. Соотношение нетто- и гросс-продукции и газообмен CO₂ в высокопродуктивных сосняках и березняках // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. Т. XX. С. 174–190.

Чарный А.М. Патофизиология гипоксических состояний. М.: Медгиз, 1961. 343 с.

Чепалов В.А. Эколого-физиологические особенности пигментного аппарата у растений криолитозоны Якутии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2010. 22 с.

Черников В.А. Влияние лесных палов на возобновление лиственницы // Лесн. хоз-во. 1951. № 12. С. 62–64.

Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // Лесоведение. 1999. № 5. С. 13–21.

Чмора С.Н. Световые кривые фотосинтеза в посев кукурузы // Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности. М.: Наука, 1966. С. 142–148.

Шаши Шекхар, Санжей Чаула. Основы пространственных баз данных: Пер. с англ. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2004. 336 с.

Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С. Текущий прирост лесов России: базовая оценка на начало 3-го тысячелетия // Лесн. таксация и лесоустройство. 2008а. Вып. 1 (39). С. 83–100.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С. Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка // Докл. РАН. 2008б. Т. 421, № 6. С. 822–825.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесн. таксация и лесоустройство. 2009. Вып. 1 (41). С. 133–147.

Шегельман И.Р., Щеголева Л.В., Лукашевич В.М. Применение ГИС-технологий в изучении климатических и почвенно-грунтовых условий Республики Карелия // Вестн. Приморского ун-та. Сер. Естеств. и точные науки. 2007. № 1. С. 22–27.

Шиманюк А.П. Биология древесных и кустарниковых пород СССР. М.: Учпедгиз, 1957. С. 10–21.

Шиманюк А.П. Сосновые леса Сибири и Дальнего Востока. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 187 с.

Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В. Реакция лесотундровых сообществ Полярного Урала на изменения климата // ArcReview. 2006. № 4 (39).

Шпакова Е.Н. Использование ГИС для оценки качества атмосферного воздуха на территории Санкт-Петербурга // Информационные технологии как основа управления в сфере природопользования и охраны окружающей среды. СПб., 2007. С. 18–25.

Шумахер Д.А. Опыт использования ГИС ArcView в департаменте природных ресурсов Ленинградской области // ArcReview. 2003. № 2 (25). С. 9.

Шутов И.В., Рябинин Б.Н. Лесная политика в условиях изменяющегося климата // Лесн. хоз-во. 2009. № 2. С. 4–9.

Щепаченко Д.Г., Швиденко А.З., Шалаев В.С. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственных лесов Северо-Востока России. М.: Моск. гос. ун-т леса, 2008. 296 с.

Щербатюк А.С. Многоканальные установки с CO₂-газоанализаторами для лабораторных и полевых исследований // Инфракрасные газоанализаторы в изучении газообмена растений. М.: Наука, 1990. С. 38–54.

Щербатюк А.С., Русакова Л.В., Суворова Г.Г., Янькова Л.С. Углекислотный газообмен хвойных Предбайкалья. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 135 с.

Яковлев С.С., Фалалеев Э.Н. Возрастная структура лиственничников Магаданской области // Научный поиск молодежи – лесной промышленности края: Тез. докл. Красноярск, 1982. С. 21–26.

Якушенкова Т.П., Лосева Н.Л., Алябьев А.Ю. Свет различного спектрального состава и резистентность проростков яровой пшеницы при действии супероптимальной температуры // Вестн. Башк. ун-та. 2001. № 2 (1). С. 94–96.

Янькова Л.С., Копытова Л.Д., Филиппова А.К. и др. Сезонная изменчивость фотосинтетической активности и зеленых пигментов у ели сибирской // Материалы Всерос. конф. “Природная и антропогенная динамика наземных экосистем”. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. С. 55–58.

Alberte R.S., Thornber J.P., Fiscus E.L. Water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize // Plant Physiol. 1977. V. 59. P. 351–353.

Amir H. Razavi. ArcView GIS Developer’s Guide // On Word Press. Santa Fe, New Mexico (June 5). 2001. 400 p.

Apps M.J., Kurz W.A., Luxmoore R.J. et al. Boreal forest and tundra // Water, Air and Soil Pollution. 1993. N 70. P. 39–53.

Berninger F., Makela A., Hari P. Optimal control of gas exchange during drought: Empirical evidence // Ann. Botany. 1996. V. 77. P. 469–476.

Billings W.D. Carbon balance of Alaskan tundra and taiga ecosystems: Past, present, and future // Quart. Sci. Rev. 1987. V. 6. P. 165–177.

Bjorkman O., Ludlow M.M., Morrow P.A. Photosynthetic performance of two rainforest species in their native habitat and analysis of their gas exchange // Physiol. Plantarum. 1972. V. 16. P. 889–914.

Bolin B. The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems, SCOPE 29. London: John Wiley and Sons, 1986. P. 93–155.

- Boysen-Jensen P.* Die Stoffproduktion der Pflanzen. Jena, 1932. 108 S.
- Brooks A., Farquhar G.D.* Effect of temperature on the CO₂/O₂ specificity of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. Estimates from gas exchange measurements on spinach // *Planta*. 1985. V. 165. P. 397–406.
- Butler W.* Absorption spectroscopy in vivo theory and application // *Ann. Rev. Plant Physiol*. 1964. V. 15. P. 451–470.
- Carrara A., Kowalski A.S., Neiryck J. et al.* Net ecosystem CO₂ exchange of mixed forest in Belgium over 5 years // *Agricultural and Forest Meteorol*. 2003. V. 119, N 3–4. P. 209–227.
- Dang Q.-K., Margolis H.A., Coyea M.R., Collatz G.J.* Regulation of branch-level gas exchange of boreal trees: roles of shoot water potential and vapor pressure difference // *Tree Physiol*. 1997. V. 17. P. 521–535.
- Diemer M., Larcher W.* Biochimica e potenziale di produttività di *Quercus ilex* L. al limite settentrionale dell'areale di distribuzione. IV. Effetto della siccità sulla resa fotosintetica delle foglie // *Studi Tren. Sci. Nature. Acta Boil*. 2003. V. 68. S. 53–65.
- Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A. et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems // *Science*. 1994. V. 263 (1544). P. 185–190.
- Dohrenbursch A., Jaehne S., Neyer A.-C.* Reaktionen eines Fichtenaltbestandes auf ein verändertes Wasser- und Nährstoffangebot // *AFZ/Wald*. 1999. Bd 54, H. 2. S. 60–62.
- Ecosystems and human well-being: current state and trends: findings of the Condition and Trends Working Group* / Ed. by R. Hassan, R. Scholes, N. Ash. London: Island Press, 2005. (The millennium ecosystem assessment series; V. 1).
- Epron D., Dreyer E., Breda N.* Photosynthesis of oak trees (*Quercus petraea* (Matt) Liebl.) during drought under field conditions: diurnal course of net CO₂ assimilation and photochemical efficiency of photosystem II // *Plant, Cell and Environment*. 1992. V. 15, N 7. P. 809–820.
- Forest area and area change* // *Global forest resources assessment 2000 – Main report* / FAO Forestry Pap. 2001. V. 140. P. 1–15.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. N.Y.; Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. P. 131–217.
- Goodale Ch.L., Apps M.J., Birdsey R.A. et al.* Forests carbon sinks in the Northern Hemisphere // *Ecol. Applications*. 2002. V. 12, N 3. P. 891–899.
- Gorham E.* Northern peatlands: role in carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. Applications*. 1991. N 1. P. 182–195.
- Gover S.T., Krankina O., Olson R.J. et al.* Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems // *Ecol. Applications*. 2001. V. 11, N 5. P. 1395–1411.
- Grieu P., Guchl J.M., Aussenac G.* The effect of soil and atmospheric drought on photosynthesis and stomatal control of gas exchange in three coniferous species // *Physiol. Plantarum*. 1988. N 73. P. 97–104.
- Hall D.O., Coombs J., Scurlock J.M.O.* Biomass production. Appendix B // *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis* / Ed. by J. Coombs et al. Oxford: Pergamon, 1987.

Harmon M.E., Bible K., Ryan M.G. et al. Production, respiration, and overall carbon balance in an old-growth Pseudotsuga-Tsuga forest ecosystem // *Ecosystems*. 2004. V. 7, N 5. P. 498–512.

Heath L.S., Kauppi P.E., Burschel P. et al. Contribution of temperate forests to the world's carbon budget // *Water, Air and Soil Pollution*. 1993. V. 70, N 1–4. P. 55–69.

Houghton R.A. Terrestrial carbon storage: Global lessons for Amazonian research // *Ciencia e Cultura* J. 1997. N 12. P. 146–152.

Houghton R.A., Scole D.L. Carbon // *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990. P. 393–412.

House J.I., Prentice I.C., Le Quere C. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂ // *Global Change Biol*. 2002. V. 8. P. 1–6.

IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Bases. Contribution on Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change / Ed. by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. N.Y.; Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.

IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. N.Y.; Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. 996 p.

IPCC: Land use, land use change, and forestry / R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolib et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 30 p. (A special report of the IPCC).

Jordan D.B., Ogren W.L. The carbon dioxide/oxygen specificity of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase // *Planta*. 1984. V. 161. P. 308–313.

Khalil A.A.M., Grace J. Does xylem ABA control the stomatal behavior of water-stressed sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) seedlings? // *J. Exp. Botany*. 1993. V. 44. P. 1127–1134.

Kolchugina T.P., Vinston T.S. Framework to qualify the national terrestrial carbon cycle of the former Soviet Union // *Carbon Cycling in Boreal Forest and Subarctic Ecosystems: Biospheric Responses and Feedbacks to Global Climate Change*. Oregon: Oregon State Univ., 1993. P. 259–275.

Kunstle E., Mitscherlich G. Photosynthese, Transpiration und Atmung in einem Mischbestand im Schwarzwald // *Allg. Forst- und Jagdzeitung*. 1975. Bd 146, H. 3/4. S. 45–63.

Liski J., Karjalainen T., Pussinen A. et al. Trees as carbon sinks and sources in the European Union // *Environ. Sci. and Policy*. 2000. V. 3. P. 91–97.

Liski J., Westman C.J. Density of organic carbon in soil at coniferous forest sites in southern Finland // *Biogeochemistry*. 1995. V. 29. P. 183–197.

Makela A., Valentine H.T. The ratio of NPP to GPP: evidence of change over the course of stand development // *Tree Physiol*. 2001. V. 21. P. 1015–1030.

Mann M.E., Jones P.D. Global surface temperatures over the past two millennia // *Geophys. Res. Letters*. 2003. V. 30, N 15. P. 1820–1823.

McGuire A.D., Sitch S., Clein J.S. et al. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century. Analysis of CO₂ climate and land use effects with four process-based ecosystem models // *Global Biogeochem. Cycles*. 2001. V. 15. P. 183–266.

Melillo J.M., McGuire A.D., Kicklighter D.W. et al. Global climate change and terrestrial net primary production // *Nature*. 1993. V. 363, N 6426. P. 234–240.

Miller P.C. Assimilations unter suchungen an Tannen und Fichten einen Naturverjungung im bayerischen Wald // *Sorstwiss. Cbl.* 1959. Bd 78, H. 9/10. S. 297–317.

Mohanty P., Boyer J.S. Chloroplast response to low leaf water potentials. IV. Quantum yield is reduced // *Plant Physiol.* 1976. V. 57. P. 704–709.

Molchanov A.G. Variations in photosynthetic rate of common oak in Russian south-easty forest-steppe under changing environment // *Recent Advances on Oak Health in Europe* / Ed. by T. Oszako, C. Delatour. Warsaw: Forest Res. Inst., 2000. P. 165–173.

Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J. et al. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2001. V. 98, N 26. P. 14784–14789.

Pearson P.N., Palmer M.P. Atmospheric carbon dioxide concentration over the past 60 million years // *Nature.* 2000. V. 404. P. 695–699.

Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica // *Nature.* 1999. V. 404. P. 429–436.

Pons T.L., Welschen R.A.M. Midday depression of net photosynthesis in the tropical rainforest tree *Eperua grandiflora*: contribution of stomatal and interal conductances, respiration and Rubisco functioning // *Tree Physiol.* 2003. V. 23, N 14. P. 937–947.

Post W.M., Peng T.N., Emanuel W.R. et al. The global carbon cycle // *Amer. Scientists.* 1990. V. 78. P. 310–326.

Post W.M., Emanuel W.R., Zinke P.J. et al. Soil carbon pools and world life zones // *Nature.* 1982. V. 298. P. 156–159.

Quay P.D., Tilbrook B., Wong C.S. Oceanic uptake of fossil fuel CO₂: Carbon-13 evidence // *Science.* 1992. V. 2556, N 5053. P. 74–79.

Radoglou K. Environmental control of CO₂ assimilation rates and stomatal conductance in five oak species growing under condition in Greece // *Ann. Sci. Forestieres.* 1996. V. 53, N 2–3. P. 269–278.

Roupsard O., Gross P., Dreyer E. Limitation of photosynthetic activity by CO₂ availability in the chloroplasts of oak leaves from different species and during drought // *Ibid.* P. 243–254.

Schimel D.S., House J.L., Hibbard K.A. et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems // *Nature.* 2001. V. 414, N 8. P. 169–172.

Schulze E.-D., Heimann M. Carbon and water exchange of terrestrial systems // *Asian Change in the Context of Global Change* / Ed. by J.N. Galloway, J. Melillo. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998. P. 145–161.

Schulze E.-D., Lloid J., Kelliher F.M. et al. Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink a synthesis // *Global Change Biol.* 1999. N 3. P. 703–722.

Schulze E.-D., Valentini R., Cias Ph. et al. CarboEurope Integrated Project // *Rep. Workshop FAO “Harmonization of terrestrial carbon measurements in CEE countries”* (Prague, 22–25 June, 2004). Prague, 2004. P. 1–32.

Schwarz P.A., Fahey T.J., Dawson T.E. Seasonal air and soil temperature on photosynthesis in red spruce (*Picea rubens*) saplings // *Tree Physiol.* 1997. V. 17. P. 187–194.

Sedjo R.A. Temperate forest ecosystems in global carbon cycle // *Ambio.* 1992. V. 21 (4). P. 274–277.

Shvidenko A., Nilsson S. Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961–1998: An assessment based on long-term forest inventory data // *Climatic Change.* 2002. V. 55. P. 5–37.

Shvidenko A., Nilsson S. Synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // *Tellus*. 2003. V. 55B. P. 391–415.

Sohnngen B., Andrasko K., Gytarsky M. et al. Carbon Inventory and Mitigation Potential of the Russian Forest and Land Base. Washington: WRI, 2005. 52 p.

Sundquist E.T. The global carbon dioxide budget // *Science*. 1993. V. 259, N 5097. P. 934–941.

Tasker R., Smith H. The function of phytochrome in the natural environment. V. Seasonal changes in radiant energy quality in woodlands // *Photochem. and Photobiol.* 1977. V. 26. P. 487–491.

Troeng E., Linder S. Gas exchange in a 20-year-old of *Scots pine*. I. Net photosynthesis of current and one-year-old shoots within and between seasons // *Physiol. Plantarum*. 1982. V. 54, N 1. P. 7–14.

Turner D.P., Winjum J.K., Kolchugina T.P. et al. Accounting for biological and anthropogenic factors in national land-base carbon budgets // *Ambio*. 1997. V. 26, N 4. P. 220–226.

Valentini R., Dore S., March G. et al. Carbon and water exchanges of two contrasting central Siberia landscape types: regenerating forest and bog // *Functional Ecol.* 2000. V. 14. P. 87–96.

Valentini R., Mattenczi G., Dolman A.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests // *Nature*. 2001. V. 404. P. 841–892.

Whitaker R.N., Woodwell G.M. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest, New York // *J. Ecology*. 1968. V. 56. P. 1–25.

Wit de H.A., Kvindesland S. Carbon stocks in Norwegian forest soils and effects on forest management on carbon storage // *Rapport Fraskogforskningen*. 1999. Suppl. V. 14. 52 p.

WMO WDCGG data summary N 29. Gaw data. Jap. Meteorol. Agency in cooperation with WMO, 2005. V. IV. 85 p.

Woodall C.W., Likens G.C. Relationships between forest fine and coarse woody debris carbon stocks across latitudinal gradients in the United States as an indicator of climate change effects // *Ecol. Indicators*. 2008. V. 8. P. 686–690.

**Распределение площадей лесов по преобладающим древесным породам
и группам возраста [Форма..., 2011]**

Порода	Площадь лесов (покрытые лесной растительностью земли), га				
	Молодняки	Средне- возрастные	Приспе- вающие	Спелые и перестойные	Всего
1	2	3	4	5	6
<i>Аларское лесничество</i>					
Сосна	1797	10 626	13 277	2688	28 388
Ель	0	81	0	0	81
Лиственница	7	1904	85	181	2177
<i>Ангарское лесничество</i>					
Сосна	12 449	21 773	6381	11 132	51 735
Ель	13	759	385	1497	2654
Лиственница	7	437	282	2117	2843
<i>Балаганское лесничество</i>					
Сосна	81 945	78 914	29 073	54 763	244 695
Ель	867	5795	2160	4253	13 075
Лиственница	2908	29 103	13 040	28 977	74 028
<i>Баяндаевское лесничество</i>					
Сосна	7770	2596	2347	6759	19 472
Ель	1319	2307	552	3391	7569
Лиственница	9416	15 360	4470	56 404	85 650
<i>Бирюсинское лесничество</i>					
Сосна	95 585	22 740	7738	73 824	199 887
Ель	10 048	3235	6799	64 642	84 724
Лиственница	6802	6037	1761	53 717	68 317
<i>Бодайбинское лесничество</i>					
Сосна	33 734	118 357	38 802	162 873	353 766
Ель	154	4572	2947	78 937	86 610
Лиственница	226 796	809 449	541 648	2 379 225	3 957 118
<i>Братское лесничество</i>					
Сосна	309 395	87 772	40 819	184 616	622 602
Ель	7550	13 511	9661	26 575	57 297
Лиственница	9871	10 888	5399	56 526	82 684
<i>Голоустненское лесничество</i>					
Сосна	21 533	38 206	11 216	37 112	108 067
Ель	263	2800	329	581	3973
Лиственница	634	5712	2094	17 353	25 793
<i>Жигаловское лесничество</i>					
Сосна	58 673	71 025	36 640	135 279	301 617
Ель	7108	23 611	10 242	23 555	64 516
Лиственница	72 888	202 513	79 176	368 919	723 496

Продолжение прил. 1

1	2	3	4	5	6
<i>Заларинское лесничество</i>					
Сосна	80 753	61 726	2647	12 890	158 016
Ель	459	1461	362	2791	5073
Лиственница	1854	5763	1524	10 880	20 021
<i>Зиминское лесничество</i>					
Сосна	136 472	53 219	10 722	19 209	219 622
Ель	650	2123	1330	5462	9565
Лиственница	862	6638	2653	15 151	25 304
<i>Илимское лесничество</i>					
Сосна	176 912	73 324	51 650	287 769	589 655
Ель	15 548	18 689	17 287	96 317	147 841
Лиственница	34 454	17 891	13 142	224 889	290 376
<i>Иркутское лесничество</i>					
Сосна	24 675	79 562	23 577	20 843	148 657
Ель	33	972	823	1285	3113
Лиственница	170	1664	574	2738	5146
<i>Казаченско-Ленское лесничество</i>					
Сосна	131 093	199 460	49 432	261 013	640 998
Ель	22 654	98 831	45 082	145 679	312 246
Лиственница	74 835	211 949	64 337	295 455	646 576
<i>Катангское лесничество</i>					
Сосна	843 665	352 395	186 278	900 253	2 282 591
Ель	53 339	88 353	30 840	172 990	345 522
Лиственница	1 655 305	898 132	311 449	2 877 237	5 742 123
<i>Качугское лесничество</i>					
Сосна	30 330	68 315	22 413	80 298	201 356
Ель	13 229	16 265	5923	30 040	65 457
Лиственница	114 829	288 015	86 633	631 518	1 120 995
<i>Киренское лесничество</i>					
Сосна	234 375	222 909	97 164	1 102 495	1 656 943
Ель	23 878	46 101	34 753	208 423	313 155
Лиственница	66 913	69 351	59 062	729 030	924 356
<i>Кировское лесничество</i>					
Сосна	32 609	56 775	7007	12 814	109 205
Ель	259	1253	377	414	2303
Лиственница	595	1216	571	8248	10 630
<i>Куйтунское лесничество</i>					
Сосна	135 010	69 094	25 547	112 334	341 985
Ель	928	5466	2058	2933	11 385
Лиственница	1176	4977	2657	18 009	26 819

1	2	3	4	5	6
<i>Мамское лесничество</i>					
Сосна	87 202	121 966	72 683	368 579	650 430
Ель	27 237	66 021	70 385	205 300	368 943
Лиственница	97 062	183 225	141 661	642 777	1 064 725
<i>Нижнеилымское лесничество</i>					
Сосна	208 062	120 214	138 833	325 548	792 657
Ель	54 505	62 783	33 014	161 804	312 106
Лиственница	29 287	40 522	68 068	237 177	375 054
<i>Нижнеудинское лесничество</i>					
Сосна	273 044	105 384	34 309	116 184	528 921
Ель	7893	8133	5441	38 570	60 037
Лиственница	25 990	186 788	82 383	339 688	634 849
<i>Нукутское лесничество</i>					
Сосна	6402	12 007	3436	2398	24 243
Ель	0	0	0	0	0
Лиственница	512	2956	1443	196	5107
<i>Ольхонское лесничество</i>					
Сосна	33 844	48 061	20 712	64 309	166 926
Ель	504	2971	1767	4110	9352
Лиственница	7796	41 510	16 373	72 979	138 658
<i>Осинское лесничество</i>					
Сосна	45 160	34 826	13 667	47 906	141 559
Ель	107	1767	2011	3916	7801
Лиственница	195	677	625	22 742	24 239
<i>Падунское лесничество</i>					
Сосна	239 225	67 423	67 622	189 765	564 035
Ель	8327	9814	6227	27 220	51 588
Лиственница	14 806	24 941	10 719	113 716	164 182
<i>Северное лесничество</i>					
Сосна	120 302	90 696	65 943	306 639	583 580
Ель	6877	16 054	15 855	99 127	137 913
Лиственница	9622	11 438	13 137	215 028	249 225
<i>Слюдянское лесничество</i>					
Сосна	629	3246	1210	8749	13 834
Ель	0	155	90	4406	4651
Лиственница	75	3070	2465	14 776	20 386
<i>Тайшетское лесничество</i>					
Сосна	178 785	109 476	13 876	65 027	367 164
Ель	7680	11 154	12 699	46 575	78 108
Лиственница	1127	6435	913	14 010	22 485

Окончание прил. 1

1	2	3	4	5	6
<i>Тулунское лесничество</i>					
Сосна	220 394	98 691	21 250	70 031	410 366
Ель	1274	5149	1822	10 786	19 031
Лиственница	6544	30 513	7992	60 294	105 343
<i>Усольское лесничество</i>					
Сосна	103 422	64 376	15 834	35 540	219 172
Ель	1142	3405	970	2183	7700
Лиственница	1044	2598	1635	11 763	17 040
<i>Усть-Кутское лесничество</i>					
Сосна	178 281	310 534	149 528	552 035	1 190 378
Ель	34 584	67 594	32 873	119 622	254 673
Лиственница	116 093	263 360	134 606	835 013	1 349 072
<i>Усть-Ордынское лесничество</i>					
Сосна	43 736	28 339	19 596	17 691	109 362
Ель	454	2657	1708	3130	7949
Лиственница	12 159	7041	6212	37 442	62 854
<i>Усть-Удинское лесничество</i>					
Сосна	66 613	77 164	55 306	155 982	355 065
Ель	12 692	25 057	15 164	71 145	124 058
Лиственница	9325	23 607	20 131	109 603	162 666
<i>Черемховское лесничество</i>					
Сосна	74 813	77 938	14 965	16 848	184 564
Ель	373	4337	2058	3069	9837
Лиственница	4353	7372	2339	4566	18 630
<i>Чунское лесничество</i>					
Сосна	254 334	129 067	55 124	385 209	823 734
Ель	11 177	26 620	34 580	177 449	249 826
Лиственница	7512	11 224	8518	121 773	149 027
<i>Шелеховское лесничество</i>					
Сосна	18 642	16 993	8482	24 819	68 936
Ель	146	625	320	1975	3066
Лиственница	167	1037	725	14 403	16 332
<i>Всего по Иркутской области</i>					
Сосна	4 601 665	3 205 189	1 435 106	6 232 223	15 474 183
Ель	333 271	650 481	408 894	1 850 152	3 242 798
Лиственница	2 623 991	3 435 313	1 710 502	10 644 520	18 414 326

**Брутто-продукция хвойных древостоев по административным районам
Иркутской области в 2003 г.**

Административный район	Продуктивность фотосинтеза (CO ₂) древостоев, т/год			
	сосновых	еловых	лиственничных	Общая
Ангарский	445 397,67	36 784,80	33 639,99	515 822,46
Балаганский	2 040 198,65	192 308,98	1 231 323,52	3 463 831,14
Бодайбинский	2 966 121,80	1 089 686,27	52 046 729,36	56 102 537,43
Братский	9 283 211,31	1 455 297,07	2 946 141,05	13 684 649,43
Жигаловский	2 442 921,97	919 016,19	10 530 877,40	13 892 815,56
Заларинский	1 357 663,66	70 256,58	290 421,94	1 718 342,18
Зиминский	1 791 329,51	128 744,38	352 635,26	2 272 709,15
Иркутский	2 235 349,80	107 925,47	414 150,81	2 757 426,09
Казаченско-Ленский	5 345 428,65	4 369 112,92	9 975 985,32	19 690 526,89
Катангский	18 027 609,25	4 705 711,96	73 985 622,52	96 718 943,72
Качугский	1 690 322,29	886 832,14	15 694 224,45	18 271 378,88
Киренский	13 032 909,20	4 083 976,90	9 758 090,78	26 874 976,88
Куйтунский	2 747 395,86	169 661,90	337 326,10	3 254 383,87
Мамско-Чуйский	5 187 416,89	4 866 653,89	13 519 893,08	23 573 963,85
Нижнеилимский	6 205 216,76	4 147 854,01	4 397 684,98	14 750 755,75
Нижнеудинский	4 246 836,90	777 421,92	9 302 421,63	14 326 680,45
Ольхонский	1 375 857,73	130 857,72	2 045 887,83	3 552 603,28
Слюдянский	112 402,82	58 034,94	242 275,10	412 712,86
Тайшетский	4 617 254,86	2 065 245,54	1 050 792,03	7 733 292,43
Тулунский	3 345 211,24	261 761,80	1 517 709,26	5 124 682,29
Усольский	1 816 186,52	112 944,72	205 249,27	2 134 380,50
Усть-Илимский	9 207 546,25	3 684 020,66	5 479 586,67	18 371 153,58
Усть-Кутский	9 723 044,58	3 481 251,48	17 447 641,93	30 651 937,99
Усть-Ордынский Бурятский АО	3 614 432,32	358 700,49	2 322 637,76	6 460 137,94
Усть-Удинский	2 849 598,77	1 653 962,39	1 956 576,78	2 060 459,91
Черемховский	1 594 217,59	144 548,94	321 693,38	11 278 562,27
Чунский	6 520 869,13	3 202 365,59	1 555 327,56	764 472,03
Шелеховский	560 214,26	41 034,07	163 223,70	6 295 770,57
Всего по области	124 382 166,24	43 201 973,71	239 125 769,43	406 709 909,39

Продолжение прил. 2

**Брутто-продукция хвойных древостоев по административным районам
Иркутской области в 2010 г.**

Административный район	Продуктивность фотосинтеза (CO ₂) древостоев, т/год			
	сосновых	еловых	лиственничных	Общая
Ангарский	709 517,91	78 232,35	57 089,86	844 840,11
Балаганский	3 250 033,77	408 994,59	2 089 658,45	5 748 686,82
Бодайбинский	4 725 028,14	2 317 498,63	88 327 629,94	95 370 156,71
Братский	14 788 143,44	3 095 064,19	4 999 846,47	22 883 054,10
Жигаловский	3 891 571,49	1 954 524,72	17 871 775,11	23 717 871,32
Заларинский	2 162 756,43	149 418,73	492 870,20	2 805 045,35
Зиминский	2 853 585,56	273 808,09	598 451,37	3 725 845,02
Иркутский	3 560 909,30	229 531,33	702 848,39	4 493 289,02
Казааченско-Ленский	8 515 260,83	9 292 044,38	16 930 077,08	34 737 382,29
Катангский	28 717 957,88	10 007 908,97	125 559 756,92	164 285 623,77
Качугский	2 692 681,20	1 886 077,05	26 634 404,63	31 213 162,88
Киренский	20 761 407,26	8 685 629,18	16 560 291,91	46 007 328,35
Куйтунский	4 376 598,01	360 829,75	572 470,46	5 309 898,22
Мамско-Чуйский	8 263 548,30	10 350 193,46	22 944 383,39	41 558 125,14
Нижнеилимский	9 884 902,16	8 821 480,31	7 463 237,29	26 169 619,76
Нижнеудинский	6 765 205,61	1 653 388,03	15 786 983,45	24 205 577,09
Ольхонский	2 191 739,55	278 302,67	3 472 041,87	5 942 084,09
Слюдянский	179 057,54	123 426,26	411 161,00	713 644,80
Тайшетский	7 355 280,94	4 392 276,77	1 783 281,50	13 530 839,21
Тулунский	5 328 917,11	556 703,91	2 575 678,88	8 461 299,90
Усольский	2 893 182,74	240 206,05	348 325,08	3 481 713,87
Усть-Илимский	14 667 609,10	7 835 019,17	9 299 314,48	31 801 942,75
Усть-Кутский	15 488 797,26	7 403 778,26	29 610 099,98	52 502 675,50
Усть-Ордынский Бурятский АО	5 757 785,95	762 869,01	3 941 709,51	5 757 785,95
Усть-Удинский	4 539 407,10	3 517 577,19	3 320 473,59	4 539 407,10
Черемховский	2 539 586,53	307 420,56	545 940,42	2 539 586,53
Чунский	10 387 735,97	6 810 655,56	2 639 520,26	10 387 735,97
Шелеховский	892 420,59	87 269,52	277 004,19	892 420,59
Всего по области	198 140 627,65	91 880 128,69	405 816 325,68	695 837 082,02

**Первичная нетто-продукция хвойных древостоев по административным
районам Иркутской области**

Административный район	Первичная нетто-продукция (С) древостоев, т/год			
	2003 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Ангарский	70 339,43	105 381,12	114 736,93	115 205,47
Балаганский	472 340,61	795 190,63	806 634,54	783 911,84
Бодайбинский	7 650 346,01	15 657 292,09	14 213 184,31	13 005 021,37
Братский	1 866 088,56	3 011 285,89	3 130 813,81	3 120 416,47
Жигаловский	1 894 474,85	3 704 362,46	3 446 330,68	3 234 255,18
Заларинский	234 319,39	363 935,33	387 696,09	382 506,18
Зиминский	309 914,88	480 726,11	512 392,34	508 069,78
Иркутский	376 012,65	579 014,87	620 102,21	612 721,23
Казаченско-Ленский	2 685 071,85	4 993 167,10	4 768 127,82	4 736 915,77
Катангский	13 188 946,87	25 744 597,72	23 980 357,51	22 402 585,06
Качугский	2 491 551,67	5 018 674,39	4 593 953,60	4 256 340,39
Киренский	3 664 769,57	6 349 277,31	6 323 134,96	6 273 726,59
Куйтунский	443 779,62	672 296,29	727 162,73	724 077,03
Мамско-Чуйский	3 214 631,43	6 097 888,79	5 759 078,01	5 667 017,06
Нижеилимский	2 011 466,69	3 516 715,51	3 476 914,30	3 568 584,51
Нижеудинский	1 953 638,24	3 668 604,64	3 492 337,60	3 300 760,51
Ольхонский	484 445,90	882 266,46	854 942,65	810 284,19
Слюдянский	56 279,03	105 572,91	100 434,31	97 315,20
Тайшетский	1 054 539,88	1 723 401,64	1 773 787,44	1 845 114,44
Тулунский	698 820,31	1 147 559,61	1 181 604,52	1 153 813,62
Усольский	291 051,89	439 582,13	476 350,87	474 779,16
Усть-Илимский	2 505 157,31	4 287 978,53	4 297 751,42	4 336 628,56
Усть-Кутский	4 179 809,73	7 739 930,19	7 420 656,70	7 159 455,75
Усть-Ордынский Бурятский АО	858 514,17	1 453 541,07	1 469 464,35	1 426 686,06
Усть-Удинский	880 927,90	1 532 817,41	1 520 282,28	1 551 471,53
Черемховский	280 971,81	437 740,57	465 226,45	462 674,66
Чунский	1 537 985,76	2 527 374,32	2 592 004,65	2 705 169,79
Шелеховский	104 246,19	165 595,54	173 961,23	171 367,40
Всего по области	55 460 442,19	103 201 770,62	98 679 424,29	94 886 874,82

**Продукция кислорода хвойных древостоев по административным
районам Иркутской области**

Административный район	Продукция кислорода (O ₂) древостоев, т/год			
	2003 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Ангарский	375 143,60	562 032,61	611 930,27	614 429,17
Балаганский	2 519 149,92	4 241 016,67	4 302 050,88	4 180 863,14
Бодайбинский	40 801 845,40	83 505 557,79	75 803 649,64	69 360 113,97
Братский	9 952 472,31	16 060 191,44	16 697 673,65	16 642 221,17
Жигаловский	10 103 865,86	19 756 599,76	18 380 430,29	17 249 360,96
Заларинский	1 249 703,40	1 940 988,41	2 067 712,49	2 040 032,98
Зиминский	1 652 879,38	2 563 872,57	2 732 759,14	2 709 705,47
Иркутский	2 005 400,79	3 088 079,32	3 307 211,76	3 267 846,56
Казааченско-Ленский	14 320 383,19	26 630 224,53	25 430 015,03	25 263 550,76
Катангский	70 341 049,98	137 304 521,16	127 895 240,07	119 480 453,65
Качугский	13 288 275,55	26 766 263,41	24 501 085,85	22 700 482,09
Киренский	19 545 437,73	33 862 812,34	33 723 386,44	33 459 875,16
Куйтунский	2 366 824,63	3 585 580,22	3 878 201,22	3 861 744,16
Мамско-Чуйский	17 144 700,98	32 522 073,57	30 715 082,75	30 224 091,01
Нижнеилимский	10 727 822,36	18 755 816,06	18 543 542,91	19 032 450,73
Нижнеудинский	10 419 403,96	19 565 891,42	18 625 800,56	17 604 056,06
Ольхонский	2 583 711,48	4 705 421,14	4 559 694,11	4 321 515,70
Слюдянский	300 154,81	563 055,50	535 649,64	519 014,40
Тайшетский	5 624 212,68	9 191 475,42	9 460 199,69	9 840 610,33
Тулунский	3 727 041,67	6 120 317,91	6 301 890,80	6 153 672,66
Усольский	1 552 276,73	2 344 438,03	2 540 537,99	2 532 155,54
Усть-Илимский	13 360 838,97	22 869 218,85	22 921 340,93	23 128 685,64
Усть-Кутский	22 292 318,54	41 279 627,68	39 576 835,73	38 183 764,00
Усть-Ордынский Бурятский АО	4 578 742,23	7 752 219,07	7 837 143,19	7 608 992,35
Усть-Удинский	4 698 282,14	8 175 026,17	8 108 172,14	8 274 514,82
Черемховский	1 498 516,30	2 334 616,36	2 481 207,72	2 467 598,20
Чунский	8 202 590,74	13 479 329,68	13 824 024,81	14 427 572,21
Шелеховский	555 979,66	883 176,20	927 793,20	913 959,49
Всего по области	295 789 025,01	550 409 443,30	526 290 262,89	506 063 332,38

**Годовая потребность в топливе для муниципальных котельных
Иркутской области (без учета предприятий ОАО "Иркутскэнерго")
[Паспорт..., 2011]**

Административный район	Годовая потребность в топливе			
	Уголь, т	Жидкое, т	Древесное, м ³	Газообразное, тыс. м ³
Ангарский	300,0	1800,0	-	-
Балаганский	4000,0	-	1200,0	-
Бодайбинский	81 687,0	16 890,0	-	-
Братский	171 193,41	-	36 512,0	-
Жигаловский	2964,0	-	4387,0	1057,0
Заларинский	23 572,0	-	1082,0	-
Зиминский	39 772,0	-	-	-
Иркутский	384 894,0	99 341,4	1496,0	-
Казаченско-Ленский	43 507,9	-	7146,9	-
Катангский	-	1,11	-	-
Качугский	5710,0	-	12 771,8	-
Киренский	10 490,15	15 316,06	750,0	-
Куйтунский	19 875,0	-	1032,0	-
Мамско-Чуйский	46 000,0	-	-	-
Нижнеилимский	29 650,0	135,0	156 887,0	-
Нижнеудинский	80 672,0	13 540,0	24 349,0	-
Ольхонский	5500,0	-	2650,0	-
Слюдянский	147 926,0	640,0	-	-
Тайшетский	192 857,0	360,0	30 700,0	-
Тулунский	121 495,0	277,0	3290,0	-
Усольский	32 824,2	10 700,0	-	-
Усть-Илимский	11 900,65	-	24 007,0	-
Усть-Кутский	141 909,0	28 221,0	59 516,0	26 666,0
Усть-Ордынский Бурятский АО	24 104,5	-	56,0	-
Усть-Удинский	4610,0	-	8950,0	-
Черемховский	95 587,0	2394,84	1650,0	-
Чунский	64 371,0	-	14 556,0	-
Шелеховский	7806,61	-	-	-
Всего по области	1 795 178,42	133 347,46	65 345,7	27 723,0

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ФОТОСИНТЕЗ И КРУГОВОРОТ УГЛЕРОДА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ	5
1.1. Влияние факторов среды на интенсивность фотосинтеза растений	–
1.2. Круговорот углерода в наземных экосистемах	9
2. СТАБИЛИЗИРУЮЩИЙ ФАКТОР ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА – CO ₂ -ПОГЛОТИТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ЛЕСОВ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ	19
2.1. Изменение концентрации углекислого газа в атмосфере	–
2.2. Изменения климатических показателей	20
2.3. Поглощение углекислого газа лесами бореальной зоны	23
2.4. Лесная политика в рамках Киотского протокола	24
2.5. Геоинформационные системы как инструмент исследования экосистем регионального масштаба	25
3. ХВОЙНЫЕ ДРЕВОСТОИ В ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ	27
3.1. Климат, растительный и почвенный покров региона	–
3.2. Хвойные древостои Иркутской области	30
3.3. Исследования фотосинтетической активности хвойных деревьев	32
4. ИЗМЕНЕНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФАКТОРОВ СРЕДЫ В ПЕРИОД ВЕГЕТАЦИИ	37
4.1. Погодные условия периодов наблюдений	–
4.2. Фотосинтетическая продуктивность сосны, ели и лиственницы при экстремальном и оптимальном почвенном увлажнении	39
5. ДИНАМИКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ	45
5.1. Удельная и общая фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев	47
5.2. Первичная нетто-продукция хвойных древостоев	50
6. КИСЛОРОДОПРОДУЦИРУЮЩАЯ И ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЬНАЯ ФУНКЦИИ ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ	54
6.1. Продуктирование кислорода хвойными древостоями области	–
6.2. Соотношение суммарных выбросов CO ₂ от предприятий теплоэнергетики и фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев	56
6.3. Соотношение выбросов CO ₂ от предприятий ОАО “Иркутскэнерго” и фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
ЛИТЕРАТУРА	69
ПРИЛОЖЕНИЯ	86

Научное издание

**Суворова Галина Георгиевна
Попова Екатерина Владимировна**

**ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ
ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Утверждено к печати Ученым советом
Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН*

Редактор *М.А. Трашкеева*
Художественный редактор *Н.Ф. Суранова*
Оформление обложки *Л.Н. Ким*
Корректор *В.В. Борисова*
Компьютерная верстка *Н.М. Райзвих*

Подписано в печать 21.09.2015. Формат 70×100¹/₁₆. Гарнитура Cambria. Печать
офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 7,74. Уч.-изд. л. 6,4. Тираж 300 экз.
Заказ № 10/15.

ООО "Академическое издательство "Гео", 630055, Новосибирск, ул. Мусы Джалиля, 3/1
Тел.: (383) 328-31-13, <http://www.izdatgeo.ru>