
СОСТОЯНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Л.М. Павлова, И.М. Котельникова, Н.Г. Куимова,
Н.Ю. Леусова, Л.П. Шумилова

Институт геологии и природопользования ДВО РАН
пер. Рёлочный, 1, Благовещенск, Россия, 675000

В вегетативных органах растений, произрастающих в техногенно измененной среде, меняются количественное содержание и соотношение фотосинтетических пигментов. Показатели, характеризующие соотношение основных групп фотосинтетических пигментов древесных растений, предлагается использовать для оценки напряженности окружающей среды.

Ключевые слова: фотосинтетические пигменты, хлорофилл, тяжелые металлы, урбанизация, древесные растения.

Растения урбанизированных экосистем находятся в очень сложных условиях. Крупные города уже давно представляют собой техногенные геохимические провинции, которые по уровню накопления химических элементов подчас превосходят территории развития рудных полей и месторождений [1], что самым негативным образом влияет на качество жизни городского населения. Растительный покров городов находится под мощным техногенным прессом поллютантов, поступающих из воздуха и загрязненных почв. Высокие концентрации тяжелых металлов в первую очередь вызывают денатурацию белков в органах растений, в том числе ферментов биосинтеза и фотосинтетических пигментов. Отрицательная корреляция между высокими концентрациями токсичных элементов (Cu, Sn, Co, Ag, Mo, Cr, Sc, W) в растительном покрове и содержанием в нем хлорофилла показана на примере урбанизированной территории и при разработке рудных месторождений [2]. В лабораторных экспериментах выявлено угнетающее действие Cu [3] и Pb [4] на синтез хлорофиллов. В присутствии Zn, Cd, Hg в клетках эвглены зеленой меняется соотношение хлорофиллов *a* и *b*, возрастает содержание феофитина [5]. Тем не менее имеющихся сведений по адаптации фотосинтетического пигментного комплекса древесных растений к условиям урбанизации недостаточно. В зависимости от состава приоритетных загрязнителей города имеют различную геохимическую специализацию. Для исследований состояния фотосинтетического аппарата растений в урбанизированной среде наиболее информативной является система «почва—растительность» [2] в силу приграничного взаимодействия четырех геосфер: лито-, гидро-, атмо- и биосферы. Количественные градации показателей такой системы можно использовать для биогеохимической индикации городской среды, для оценки эффективности фотосинтетической продуктивности растений, необходимости применения дополнительных защитных мероприятий и т.д. В связи с этим целью исследований было определение состояния основных групп фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных

пород, произрастающих в городе с превалированием аэротехногенного загрязнения (на примере г. Благовещенска).

Объекты и методы исследования. Специфичность загрязнения воздушной среды в г. Благовещенске обусловлена наличием значительного количества автотранспорта, широкой сетью отопительной системы частного сектора, котельных некоторых предприятий и расположением теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) в черте города [6]. Из 117 тыс. т загрязняющих веществ, попадающих в атмосферный воздух Приамурья ежегодно, выбросы Благовещенской ТЭЦ от сжигания угля (оксиды азота, углерода, серы, соединения тяжелых металлов, сажа и др.) составляют в среднем 18,8 тыс. т [7]. Господствующее северо-западное направление ветров обуславливает рассеивание значительной части этих выбросов над селитебной зоной города. Степень воздействия выхлопов автотранспорта на окружающую среду определяется качеством используемого топлива и интенсивностью транспортного потока, увеличивающегося год от года. Выделяемые двигателями внутреннего сгорания бенз(а)пирен, формальдегид, окислы азота, свинец также попадают в первую очередь в атмосферу. Кроме того, в воздухе г. Благовещенска в значительных количествах регистрируется пыль как еще один немаловажный фактор негативного воздействия на биотическую компоненту урбоэкосистемы.

Учетные точки были заложены в разных частях города: рекреационных зонах — на территории Первомайского (ПП) и Городского парков (ПГ) и северной окраине города (станция Широкая (Ш)) и зонах интенсивного аэротехногенного воздействия — селитебная зона вблизи Благовещенской ТЭЦ (влияние выбросов от сжигания угля) и кольцевая развязка (К) 1-го микрорайона (влияние выхлопов автотранспорта). Выбор древесных пород (тополь Симони *Populus simonii* Carr., ильм мелколистный *Ulmus pumila* L., береза плосколистная *Betula platyphylla* Sukacz. и сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L.) был обусловлен их количественным преимуществом в составе городских насаждений [8]. Условия сбора биомассы по возможности были унифицированы: отбирали листья и хвою нижнего яруса 30—35-летних экземпляров, здоровых по внешнему виду, без механических, фито- и энтомоповреждений в утренние часы при ясной безоблачной погоде. Исключение составили образцы сосны обыкновенной в Городском парке — из-за отсутствия сосны требуемого возраста была отобрана хвоя с пятилетней сосны с поврежденными раком-серянкой стволиками.

Количество и состав основных фотосинтетических пигментов (хлорофиллов группы *a* и *b* и каротиноидов) в листьях и хвое выбранных пород определяли в течение часа после отбора биомассы в 3-кратной повторности по Шлькку [9]. Поглощение растворов замеряли на спектрофотометре СФ-46. Методом рентгенофлуоресцентного анализа (P4 Pijneer, Bruker, Германия) определяли валовое содержание элементов в почве с мест произрастания обследованных пород и в золе отобранной биомассы. Агрохимический анализ почв (содержание углерода, подвижные формы фосфора, калия, кислотность почвенных растворов) выполняли согласно [10].

Результаты и обсуждение. Суммарное количество фотосинтетических пигментов значительно варьирует в зависимости от места произрастания растений.

По снижению уровня этого показателя для каждой из обследованных древесных пород экотопы мест их произрастания можно расположить в следующем порядке:

- для тополя Симони: ПП > ПГ > ТЭЦ > Ш > К;
- ильма мелколистного: ПП > ПГ > ТЭЦ > Ш > К;
- березы плосколистной: Ш > ПП > ПГ > ТЭЦ > К;
- сосны обыкновенной: Ш > ПП > ТЭЦ > ПГ > К.

Статистически значимый и достоверно высокий уровень суммарного содержания основных групп фотосинтетических пигментов был обнаружен в биомассе вегетативных органов лиственных пород по сравнению с хвойными (рис. 1).

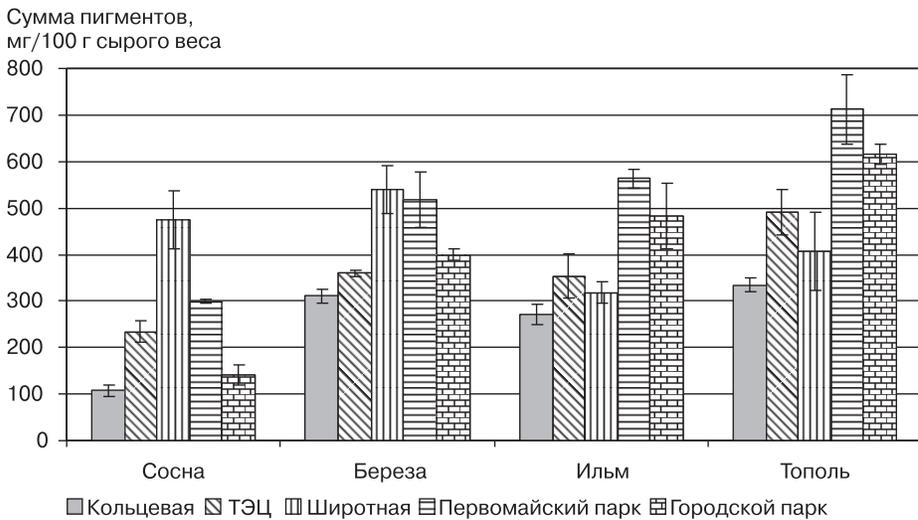


Рис. 1. Сумма основных групп фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных пород, произрастающих в разных экотопах г. Благовещенска

Листья тополя Симони, произрастающего в парковых массивах, отличались максимальным фотосинтетическим потенциалом. Низкие значения этого показателя (меньше на 31—53%) обнаружены в листьях тополей, произрастающих в местах с интенсивным движением транспорта (кольцевая развязка), вблизи ТЭЦ и на территории станции Широтной. Аналогичная тенденция содержания фотосинтетических пигментов в зависимости от места произрастания сохраняется для ильма мелколистного и березы плосколистной. В рекреационных зонах по сравнению с техногенными экотопами листья этих пород имеют более высокие количественные показатели фотосинтетических пигментов.

В хвое сосны обыкновенной самые низкие показатели суммарного содержания фотосинтетических пигментов также отмечены для техногенных экотопов — кольцевая развязка, ТЭЦ. Обнаруженной закономерности не отвечает произрастающая в Городском парке сосна, что в большей мере связано с физиологическими особенностями обследованных экземпляров. Из-за отсутствия на территории Городского парка сосны 30-летнего возраста мы отбирали хвою сосны 5-летнего возраста, стволы которых были поражены ранами рака-серянки. На территории

станции Широкой условия произрастания сосны были оптимальными — представляли собой аллею посадку и характеризовались отсутствием интенсивного антропогенного воздействия, чем, вероятно, и объясняется более высокое содержание пигментов.

Анализ количественного содержания основных фотосинтетических пигментов. Основным из фотосинтетических пигментов растений является хлорофилл *a* [11]. Молекула хлорофилла в хлоропластах листа растения выполняет три важнейшие функции: избирательно поглощает энергию света; запасает ее в виде энергии электронного возбуждения и фотохимически преобразовывает ее в химическую энергию первичных фотовосстановленных и фотоокисленных соединений. Изменения растений в ходе онтогенеза, старения, а также при действии на них неблагоприятных и повреждающих факторов среды (токсические вещества, загрязнители атмосферы, заболевания) сопровождаются изменениями не только содержания, но и соотношения пигментов. При уменьшении содержания хлорофилла *a* в зеленых листьях растений происходит увеличение доли вспомогательных пигментов — хлорофилла *b* или каротиноидов, выполняющих функции дополнительных и защитных пигментов, что рассматривается как адаптивная реакция ассимиляционного аппарата растений на любой стресс.

Древесные растения приспосабливались к изменениям, которые естественным образом происходили в окружающей среде, на протяжении многих веков. Теневые листья обычно имеют более высокую концентрацию хлорофилла *b*, чем световые. Длительный водный стресс ингибирует синтез хлорофиллов, чаще всего группы *b*. Каротиноиды менее чувствительны к водному стрессу. Им принадлежит ключевая роль в предотвращении негативных проявлений от разрушения органических молекул свободными радикалами в процессах окисления, и, как светопоглотители, каротиноиды разделяют с хлорофиллом ключевую роль в энергетическом метаболизме высших растений. Формирование адаптивного комплекса растений к условиям обитания связаны с масштабами этих изменений и скоростью их протекания. Но антропогенный пресс по интенсивности и своим масштабам нередко превосходит влияние экстремальных природных факторов.

Соотношение хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в соответствии с их функциями в норме находится примерно в пропорциях — 5 : 3 : 2 [12]. Считается, что такое соотношение пигментов наиболее оптимально для эффективной работы фотосинтетического аппарата растения, так как хлорофилл *a* выполняет основную работу в составе светособирающего комплекса, а хлорофилл *b* и каротиноиды выполняют функцию дополнительных и защитных пигментов.

В условиях урбанизированной среды соотношения основных групп фотосинтетических пигментов, близкие к оптимальным, для лиственных пород выявлены в парках (рис. 2 а, б, в) и селитебной зоне вблизи ТЭЦ. В вегетативных органах лиственных пород на территории кольцевой и станции Широкой соотношение основных групп фотосинтетических пигментов резко варьирует либо за счет значительного снижения каротиноидов (станция Широкая), либо одновременного снижения и каротиноидов, и хлорофилла *a* (кольцевая развязка). В листьях тополя

и ильма на Широтной соотношение пигментов сдвинуто в сторону увеличения хлорофилла группы *b*, что коррелирует с возрастными особенностями в распределении пигментов.

В хвое сосны обыкновенной соотношение основных групп фотосинтетических пигментов (рис. 2 г) значительно отклоняется от оптимальных во всех экотопах урбанизированной среды, за исключением селитебной зоны вблизи ТЭЦ, где обследовали одиночные посадки сосны. Сосны не выносят затенения и могут расти только на хорошо освещенных территориях. Их хвоя располагается в пучках, что вызывает значительное взаимозатенение, вследствие чего для насыщения сосне требуется в 3 раза более высокая интенсивность света.

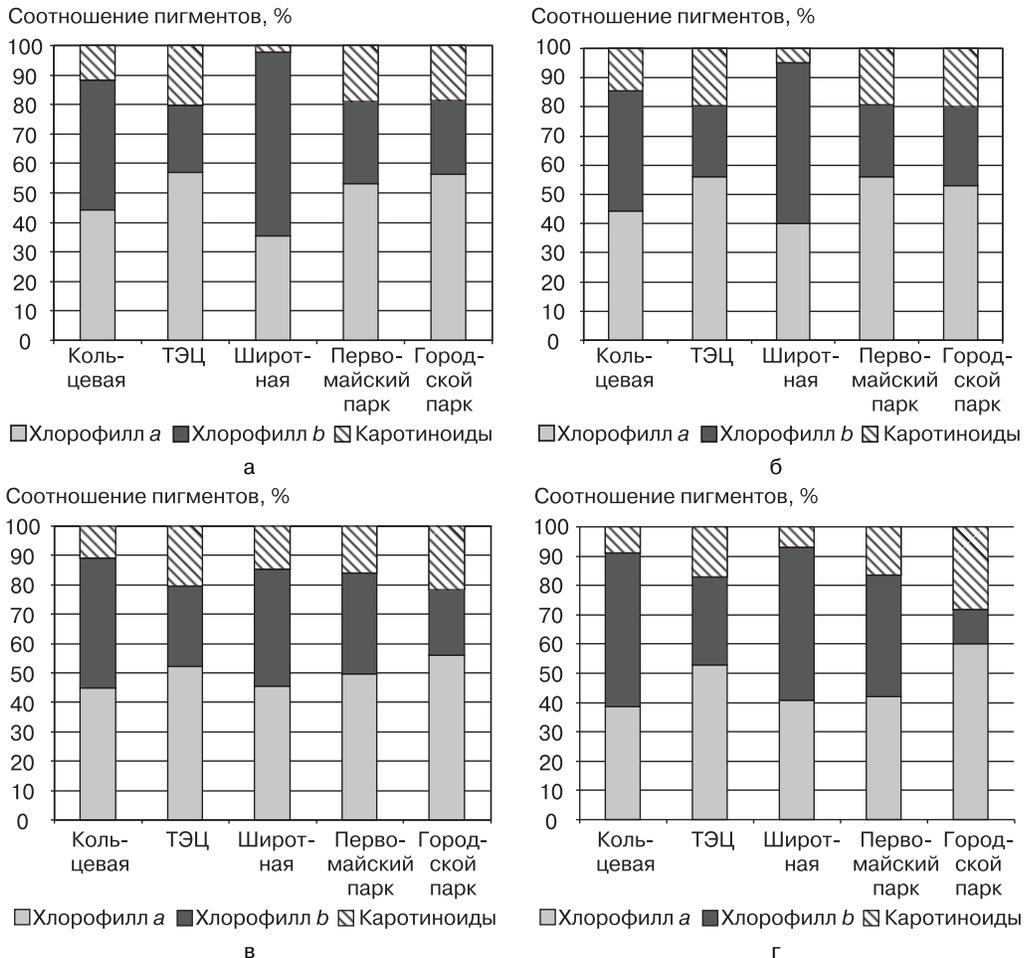


Рис. 2. Соотношение основных групп фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных пород, произрастающих в разных экотопах города:

а — в листьях тополя Симони; б — в листьях ильма мелколистного;
в — в листьях березы плосколистной; г — в хвое сосны обыкновенной

Первым экраном на пути осаждения атмосферных выпадений является поверхность листьев и хвои. Проведенное ранее нами исследование микроэлемент-

ного состава снегового покрова г. Благовещенска, как интегрального показателя степени загрязнения воздушной среды [13], выявило повышенные концентрации Pb, Cu, Zn в атмосфере в районе кольцевой автомагистрали. Таким образом, как загрязнители тяжелые металлы вызывают изменение количественного содержания и соотношения основных групп пигментов в вегетативных органах древесных пород, которые зарегистрированы в местах с влиянием выбросов автотранспорта.

Часть металлов поступает в растения из загрязненных почв, степень подвижности элементов в которых зависит от их агрохимического состояния и кислотно-щелочных свойств. Результаты агрохимического анализа почв показали невысокую степень плодородия почв на всех учетных точках: низкое содержание гумуса (за исключением места произрастания сосны на станции Широтной), высокую обеспеченность подвижными формами калия и от низкой — в парках до средней — в почвах остальных точек подвижными формами фосфора, кислую (на кольцевой и станции Широтной), слабокислую (в парках) и щелочную (ТЭЦ) реакцию почвенной среды.

Результаты анализа валового содержания элементов свидетельствует о превышении полученных для этих почв значений над среднемировыми по Pb, Cr, Cu, Sr, Ba, а по As, Zn — над ПДК (за исключением почв станции Широтной), которые относятся к веществам 1-го и 2-го класса гигиенической опасности. Слабоподвижные (Pb) и подвижные в кислых почвах Sr, Ba, Cu, Zn, Co, Mn, Cd становятся практически неподвижными (Pb, Ba, Co) или слабоподвижными в нейтральных и щелочных почвенных условиях [14], тогда как Mo, V, Cr, As и Ni — неподвижные или слабоподвижные в кислых почвах, в щелочной среде переходят в растворимые и крайне токсичные формы. Следовательно, по сравнению с парками и районом ТЭЦ из почв станции Широтной и кольцевой развязки Sr, Ba, Cu, Zn, Co могут поступать в растения в значительных количествах, так как почвы в этих точках имеют кислую реакцию среды и значительное валовое содержание этих элементов, а химический состав растений зависит не только от генетического, но и от экологического фактора. На содержание хлорофиллов в растениях, произрастающих вблизи ТЭЦ, могут влиять обнаруженные в почве в значительных количествах As и Cr, токсичность которых увеличивается в щелочной среде. С другой стороны, растения поглощают минеральные элементы избирательно [11] и их содержание в вегетативных органах древесных пород может значительно варьировать [15]. Анализ валового содержания элементов в листьях и хвое обследованных деревьев показал наличие в значительных количествах таких элементов (мг/кг с.м.) как Cu (8—50), Zn (30—1360), Sr (8—600), Rb (8—40), Ba (100—775), Ti (20—357) в зависимости от породы. Отсутствие As, Pb в растительной биомассе связано с их улетучиванием при высокотемпературном озолении биомассы.

По абсолютному содержанию каждого из элементов в золе растений трудно судить о их концентрациях, приводящих к патологическим нарушениям. Данные разных авторов по количественному содержанию отдельных элементов в растениях очень сильно отличаются. Показателем избытка или недостатка того или иного элемента является коэффициент биологического поглощения (КБП), ко-

торый рассчитывается как соотношение содержания элемента в золе растительной массы к его содержанию в корнеобитаемом слое почвы [14]. О весьма энергичном накоплении Zn листьями тополя Симони и березы плосколистной в экотопах станции Широтной, ТЭЦ, кольцевой развязки свидетельствует высокий КБП этого металла (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициент биологического поглощения (КБП) и содержание элементов в вегетативных органах древесных пород (мг/кг с.м.), произрастающих в разных экотопах урбанизированной среды г. Благовещенска

| Элемент | Порода | КБП/содержание | К | ТЭЦ | Ш | ПП | ГП | Нормальная концентрация по [15; 18] |
|---------|--------|----------------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|-------------------------------------|
| Zn | Тополь | КБП | 15 | 28 | 39 | 21—12 | 12 | 27—150 [18] |
| | | мг/кг | 338 | 970 | 400 | 500 | 330 | |
| | Ильм | КБП | 4 | 12 | Нет данных | 2 | 2 | |
| | | мг/кг | 40 | 286 | | 30 | 40 | |
| | Береза | КБП | 100 | 130 | 24 | 40 | 90 | 70—323 [15] |
| | | мг/кг | 442 | 310 | 130 | 1 360 | 825 | |
| Сосна | КБП | 35 | 12 | 46—32 | 20 | Нет данных | 27—81 [15] | |
| | мг/кг | 43 | 63 | 72 | 67 | | | |
| Cu | Тополь | КБП | 7 | 14 | 21 | 12 | Нет данных | 5—30 [18] |
| | | мг/кг | 30 | 50 | 40 | 40 | | |
| | Ильм | КБП | Не обнаружено | 14 | Нет данных | Не обнаружено | Не обнаружено | |
| | | мг/кг | | 40 | | | | |
| | Береза | КБП | Не обнаружено | Не обнаружено | 13 | 8 | 8 | 5—9 [15] |
| | | мг/кг | | | 18 | 25 | 19 | |
| Сосна | КБП | 17 | 12 | 17 | 13 | Нет данных | 1—5 [15] | |
| | мг/кг | 8 | 8 | 8 | 8 | | | |
| Sr | Тополь | КБП | 8 | 8 | 19 | 8 | 6 | Нет данных |
| | | мг/кг | 280 | 400 | 600 | 370 | 200 | |
| | Ильм | КБП | 6 | 5 | Нет данных | 5 | 5 | |
| | | мг/кг | 257 | 214 | | 170 | 200 | |
| | Береза | КБП | 4 | 11 | 9 | 11 | 12 | |
| | | мг/кг | 150 | 214 | 140 | 380 | 50 | |
| | Сосна | КБП | 4 | 1 | 3—4 | 2 | Нет данных | 7—13 [15] |
| | | мг/кг | 35 | 8 | 25 | 20 | | |

Примечание: Учетные точки: К — кольцевая развязка; ТЭЦ — селитебная территория в зоне влияния выбросов теплоэлектроцентрали; Ш — станция Широтная; ПП — Первомайский парк; ГП — Городской парк.

Ильм мелколистный и сосна обыкновенная характеризуются средним КБП Zn в парках и сильным — в зонах с аэротехногенным влиянием (кольцевая развязка, ТЭЦ). По остальным элементам (Cu, Sr) коэффициенты биологического поглощения для всех пород практически во всех учетных точках свидетельствуют от средней до сильной степени поглощения. По данным В.А. Алексеенко, увеличение количества Zn в почве в сотни раз вызвало значительное увеличение содержания этого металла в золе листьев — вяза до 68 мг/кг, дуба до 173 мг/кг, тополя до 730 мг/кг, патологическое действие токсичных концентраций которого проявляется в появлении хлороза листьев у растения, уменьшении количества и изменении соотношения хлорофиллов *a* и *b* [16; 17]. Высокие значения КБП Zn, Cu для листьев тополя Симони в зонах с аэротехногенным воздействием по сравнению с парковыми зонами коррелируют с полученными данными по содержанию (см. рис. 1) и соотношению основных групп фотосинтетических пигментов в них (см. рис. 2 а).

Выводы. Состояние фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных растений, произрастающих в разных экотопах урбанизированной среды, связано с меняющимся уровнем антропогенного воздействия. Оптимальным соотношением основных групп фотосинтетических пигментов характеризуются древесные породы парковых зон. Наиболее низкое суммарное содержание фотосинтетических пигментов и сдвиги в соотношении их основных групп отмечаются в вегетативной биомассе древесных пород, произрастающих в экотопах с воздействием выбросов автотранспорта. Снижению общей суммы пигментов и изменению их соотношения способствуют ионы тяжелых металлов (цинка, стронция, меди), накапливающихся в листьях и оказывающих ингибирующее действие на фотосинтетические функции растений. В качестве дополнительного экспресс-метода биогеохимической индикации состояния окружающей среды возможно использование характеристик фотосинтетического аппарата вегетативных органов лиственных пород по сравнению с хвойными.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Владимиров В.В.* Урбоэкология. — М.: МНЭПУ, 1999.
- [2] *Колотов Б.А., Демидов В.В., Волков С.Н.* Состояние хлорофилла как фундаментальный признак деградации окружающей среды при загрязнении ее тяжелыми металлами // ДАН. — 2003. — Т. 393. — № 4.
- [3] *Духовский П., Юнис Р., Бродайтите А. и др.* Реакция растений на комплексное воздействие природных и антропогенных стрессов // Физиология растений. — 2003. — Т. 50. — № 2.
- [4] *Poskuta J.W., Likaszek M.* Development of Photosynthetic Apparatus in Etiolated Seedlings of Pea during Greening as Influenced by Toxic Concentration of Lead // Plant Physiol. — 1997. — V. 114. — P.125.
- [5] *De Fillipis, Hampp R., Ziegler H.* The effects of sublethal concentration of zinc, cadmium and mercury on Euglena. Growth and pigments // Z. Pflanzenphysiol. — 1981. — V. 101.
- [6] *Слукина Н.* Невидимая опасность в Благовещенске: воздух, которым мы дышим [Электронный ресурс] / Общест.-политич. издание Телепорт. — Электр. Дан. — 2007. — № 34 (300) — Режим доступа: <http://www.teleport2001.ru/news/2007/08/22/825>, свободный.
- [7] Доклад о состоянии окружающей природной среды в Амурской области за 2001 г. Благовещенск // Комитет природных ресурсов по Амурской области. — 2002.
- [8] *Павлова Л.М., Таранина Н.А., Куимова Н.Г.* Инвентаризация зеленого фонда в Благовещенске // Вестник АмГУ. Сер. «Естественные и эконом. науки». — 2005. — № 31.
- [9] Практикум по физиологии растений / Под ред. Н.Н. Третьякова, Т.В. Карнаухова, Л.А. Паничкина. — М.: Агропромиздат, 1990.
- [10] *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. — М.: Изд-во МГУ, 1961.
- [11] *Веретенников А.В.* Физиология растений. — Воронеж: Воронежская гос. лесотехн. академия, 2002.
- [12] *Максимова Е.В., Косицина А.А., Макурина О.Н.* Влияние антропогенных факторов химической природы на некоторые эколого-биохимические характеристики растений // Вестник СамГУ. Естественно-научная серия. — 2007. — № 8 (58). — С. 146—152.
- [13] *Куимова Н.Г., Радомская В.И., Павлова Л.М. и др.* Особенности химического и микробиологического состава снежного покрова г. Благовещенска // Экология и промышленность России. — 2007. — № 2.
- [14] *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. — М.: Академия, 2003.

- [15] *Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С. и др.* Рассеянные элементы в бореальных лесах. — М.: Наука, 2004.
- [16] *Алексеевко В.А.* Основные факторы накопления химических элементов организмами // Соровский образов. журнал. — 2001. — Т. 7. — № 8.
- [17] *Убугунов В.Л., Кашин В.К.* Тяжелые металлы в садово-огородных почвах и растениях г. Улан-Удэ / [Электронный ресурс]: Режим доступа [<http://biogeochemistry.narod.ru/>]: Официальный сайт. 10.06.2009.
- [18] *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. — М.: Мир, 1989.

PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS' CONDITION IN VEGETATIVE ORGANS OF WOODY PLANTS IN URBAN ENVIRONMENT

**L.M. Pavlova, I.M. Kotelnikova, N.G. Kuimova,
N.U. Leusova, L.P. Schumilova**

*Institute of Geology and Nature Management of Far Eastern Branch of RAS
Relochniy lane, 1, Blagoveschensk, Russia, 675000*

Human activity influences on all environment components, including vegetation. Quantative content and photosynthetic pigments' rate are changing in vegetative organs of plants growing in technogenical environment. Indicators of basical groups of photosynthetic pigments' rate are proposed to evaluate environmental density.

Key word: photosynthetic pigments, chlorophyll, heavy metals, urbanization, woody plants.