ISSN 1998-1643

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Научный журнал

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

№ 4 (133). Июнь, 2013

Серия: Естественные и технические науки

Адрес редакции журнала
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 272.
Тел. (8142) 76-97-11
E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrsu.ru

ISSN 1998-1643

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

Scientific Journal

PROCEEDINGS
OF PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY

(following up 1947–1975)

№ 4 (133). June, 2013

Natural & Engineering Sciences

The articles are reviewed.

The Editor's Office Address
185910, Lenin Avenue, 33. Tel. +7 (8142) 769711
Petrozavodsk, Republic of Karelia
E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2008 года

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН

Сведения о журнале публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Требования к оформлению статей см.:
http://uchzap.petrsu.ru/files/reg.pdf

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка М. А. Моросин

Подписано в печать 20.05.2013. Формат 60×90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 170 экз.) Изд. № 235

Индекс 66093. Цена свободная.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77–37987
от 2 ноября 2009 г. выд. Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Отпечатано в типографии Издательства
Петрозаводского государственного университета
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Июнь, № 4 **Биология** **2013**

УДК 581.1

НАТАЛИЯ АЛЕКСЕЕВНА ГАЛИБИНА
кандидат биологических наук, и. о. заведующего аналитической лабораторией, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
ngalibina@sampo.ru

ЮЛИЯ ЛЕОНИДОВНА ЦЕЛИЩЕВА
аспирант лаборатории физиологии и цитологии древесных растений, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
botaniq.90@mail.ru

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ
доктор химических наук, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
andreev@psu.karelia.ru

ИРИНА НИКОЛАЕВНА СОФРОНОВА
ведущий биолог лаборатории физиологии и цитологии древесных растений, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
irinasof@krc.karelia.ru

КСЕНИЯ МИХАЙЛОВНА НИКЕРОВА
студентка 5-го курса эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
knikerova@yandex.ru

АКТИВНОСТЬ ПЕРОКСИДАЗЫ В ОРГАНАХ И ТКАНЯХ ДЕРЕВЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ

На деревьях березы повислой с разной степенью проявления узорчатости в структуре древесины в течение вегетационного сезона изучали активности кислых и основных пероксидаз во флоэмной и ксилемной частях камбиальной зоны. Для обеих форм березы повислой в тканях флоэмы активность пероксидазы была выше, чем в тканях ксилемы. Были выявлены отрицательные корреляции между активностью пероксидазы и интенсивностью камбиального роста. К июню, когда в стволовой части начинаются ростовые процессы, активность пероксидазы существенно снижалась по сравнению с маем, когда камбий еще неактивен. В конце июля продолжительные высокие температуры привели к существенному торможению камбиальной активности. При этом в ксилеме и во флоэме наблюдалось увеличение пероксидазной активности как для кислых, так и для основных форм фермента. Наличие высокой ферментативной активности обнаружено только в тканях ствола с узорчатым строением. У безузорчатых растений активность пероксидазы не изменялась. Обсуждаются возможные пути участия пероксидазы в процессах аномального морфогенеза древесных растений.

Ключевые слова: *Betula pendula* Roth, карельская береза, пероксидазы, крахмал, пигменты

Пероксидаза (1.11.1.7) – функционально очень лабильный фермент, способный выполнять многообразные функции в живых организмах. Основной функцией пероксидазы, наряду с супероксиддисмутазой и каталазой, является защита организма от вредного воздействия перекиси водорода и других активных форм кислорода, образующихся при окислительном стрессе [2], [24], [30]. Другой важной функцией этого фермента является непосредственное участие в процессах дифференциации тканей и органов высших наземных растений [17]. Поскольку субстратами пероксидазы могут быть фитогормоны (абсцизовая кислота, гибберелловая кислота, ауксин), фермент может регулировать состав физиологически активных веществ в тканях растения [14], [22].

Пероксидазе принадлежит ключевая роль в процессе лигнификации [3], [15], [16], [20], [21], который, в свою очередь, определяет некоторые различия между карельской березой (*Betula pendula* var. *carelica*) с аномальной узорчатой древесиной ствола и обычной березой повислой (*Betula pendula* var. *pendula*). Так, карельская береза отличается более высокой степенью жесткости структуры стенки ксилемных производных за счет увеличения лигнификации [8].

У карельской березы при любом варианте скрещивания родительских форм в потомстве появляются особи как с узорчатой, так и безузорчатой текстурой древесины. Для диагностики узорчатости в потомстве карельской березы был предложен метод определения активности пероксидазы лубяной ткани в одногодичных сеянцах в фазе глубокого покоя [13], но, несмотря на взаимосвязь данного фермента с ростовыми процессами в растительном организме и формированием аномальной структуры ствола, изучение активности пероксидазы в тканях и органах березы повислой ранее не проводилось. В связи с этим целью работы было изучить активность пероксидазы в тканях и органах у растений березы повислой с разной степенью узорчатости древесины.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были 41–43-летние деревья обычной березы повислой (*Betula pendula* Roth var. *pendula*) и карельской березы (*B. pendula* var. *carelica*). Все растения произрастали в одинаковых почвенно-климатических условиях на Агробиологической станции Карельского научного центра РАН в 2 км от Петрозаводска (61°45’ с. ш., 34°20’ в. д.).

Отбор образцов вели в течение 2010–2011 годов: май – распускание листьев (активный ксилемный транспорт); июнь – интенсивный прирост ксилемы (активный флоэмный транспорт ассимилятов к камбиальной зоне и ксилеме); июль – период активного роста, формирование вторичной клеточной стенки, в связи с отсутствием дождей и высокими температурами в это время имело место преждевременное торможение камбиального роста [7]; февраль – период покоя (из-за отрицательных температур транспорт отсутствует).

Из ствола берез препарировали ткани флоэмы и ксилемы. На анализ брали по три растения каждой формы березы.

Растительный материал растирали с жидким азотом, затем для получения экстракта ткани ксилемы и флоэмы гомогенизировали при 4 °С в буфере следующего состава: 50 мМ Hepes (pH = 7,5), 1 мМ ЭДТА, 1 мМ ЭГТА, 3 мМ DTT, 5 мМ $MgCl_2$, 0,5 мМ PMS, экстрагировали 20 минут при 4 °С и центрифугировали при 10 000 g в течение 20 минут (центрифуга Sigma 2-16PK, Германия). Осадок троекратно промывали буфером. Осадок и объединенный супернатант диализовали при 4 °С в течение 18–20 часов против буфера для гомогенизации, разбавленного в 10 раз. Активность пероксидазы определяли в полученных после диализа ферментативных препаратах.

В качестве донора водорода использовали бензидин и гваякол, в качестве субстрата – перекись водорода.

Для определения активности пероксидазы в реакции окисления бензидина использовали реакционную смесь следующего состава: 50 мМ K, Na-фосфатный буфер (pH = 7,8), 2,5–5 мМ перекись водорода и 34 мкМ бензидина. О ферментативной активности пероксидазы судили по интенсивности уменьшения оптической плотности в области поглощения бензидина (λ = 282 нм) и выражали ее таким образом: израсходовано мкмоль бензидина / г сырой ткани за минуту.

Состав реакционной смеси для определения активности пероксидазы в реакции окисления гваякола был следующий: 50 мМ K, Na-фосфатный буфер (pH = 5), 2,5–5 мМ перекиси водорода, 21,5 мМ гваякола. Ферментативную активность пероксидазы определяли по скорости образования продукта реакции тетрагваякола (с учетом коэффициента экстинкции $\varepsilon_{470нм}$ = 0,0266 $мкМ^{-1}см^{-1}$) и выражали следующим образом: образовалось мкмоль тетрагваякола / г сырой ткани за минуту.

Изменения электронных спектров поглощения реакционной смеси, содержащей ферментативный препарат из тканей ксилемы карельской березы, перекись водорода и гваякол (21,5 mM) или бензидин (33,6 мкМ), приведены в работе [1].

В листьях определяли содержание хлорофиллов и каротиноидов. Для этого замороженные высечки листьев растирали на холоде в 80 % ацетоне. Содержание хлорофиллов *a* и *b* и сумму каротиноидов определяли спектрофотометрически (спектрофотометр СФ 2000, Россия) в ацетоновой вытяжке при длинах волн 663 и 646 нм (хлорофиллы) и 470 нм (каротиноиды) [5]. Долю хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) рассчитывали исходя из того, что весь Хл b находится в ССК, а соотношение хлорофиллов *a*/*b* в этом комплексе составляет 1,2 [27].

Крахмал из листьев и тканей извлекали хлорной кислотой [29], его содержание определяли по количеству образованной в результате кислотного гидролиза глюкозы глюкозооксидазным методом.

Данные на графиках представляют средние арифметические значения, полученные из трех биологических и четырех аналитических повторностей опыта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Активность пероксидазы в тканях ствола деревьев березы повислой

Индивидуальные пероксидазы различаются по субстратной специфичности, что связано с изменением заряда и конфигурации фермента и субстрата при разных значениях pH [6]. Инкубационная среда в реакции окисления гваякола по значению pH ближе к pH-оптимуму для вакуолярных пероксидаз и пероксидаз клеточных стенок, в то время как в реакции окисления бензидина условия соответствуют pH-оптимуму цитоплазматических пероксидаз.

В мае во флоэме у растений обычной березы повислой были обнаружены высокие активности пероксидазы как в реакции окисления гваякола, так и бензидина. В тканях ксилемы в этот период активности пероксидаз не определялись совсем (рис. 1). Причиной высокой активности пероксидазы может быть повышение субстратов, в том числе соединений фенольной природы. В мае во флоэме активируется гидролиз полимерных компонентов, в результате мобилизации запасных веществ образуется большое количество сахаров, основная масса которых со ксилемным соком поднимается к главным акцепторам ассимилятов – распускающимся листьям, но часть сахаров используется в клетке на метаболические нужды, в том числе на образование фенольных соединений.

В июне – июле интенсивно фотосинтезирующие листья являются донорами ассимилятов, а основным местом потребления метаболитов становится камбиальная зона и формирующиеся клетки ксилемы и флоэмы. В этот период у растений березы повислой в ксилеме обнаружена самая высокая активность сахарозосинтазы [7], благодаря которой сахароза интенсивно оттекает из флоэмы в камбиальную зону, где в результате ее метаболизации по сахарозосинтазному пути появляется большое количество УДФ-глюкозы, идущей на синтез компонентов клеточных стенок ксилемы. При этом в июне во флоэме происходило снижение активности гваяколовой и бензидиновой пероксидазы, в то время как в ксилеме эти пероксидазы начинали проявлять незначительную активность (рис. 1а, б).

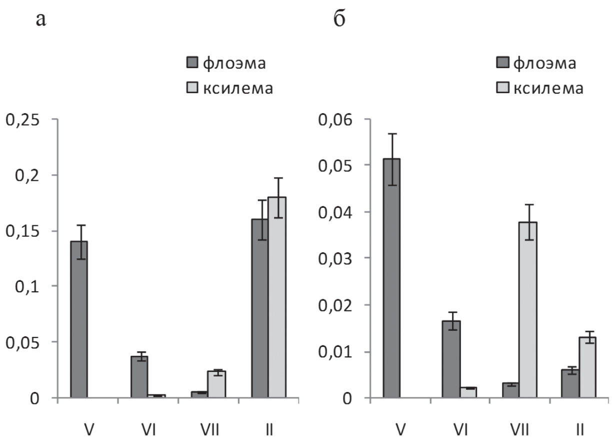


Рис. 1. Активность пероксидазы в тканях ствола растений *B. pendula* var. *pendula* в реакции окисления гваякола (а) и бензидина (б). По оси абсцисс – время взятия образцов (месяц), по оси ординат – активность фермента: а – мкмоль образовавшегося тетрагваякола на 1 г сырой ткани за минуту, б – мкмоль израсходованного бензидина на 1 г сырой ткани за минуту

Середина и конец июля в нашем исследовании – это период торможения деятельности камбия, вызванного погодными условиями. Так, отсутствие дождей в течение июля и высокие температуры привели к преждевременному торможению камбиального роста и снижению активности сахарозосинтазы в ксилеме [7].

В этот период у обычной березы повислой во флоэме происходило дальнейшее снижение активности пероксидазы, в то время как в ксилеме ее активность возрастала, особенно в реакции окисления бензидина. Так, активность бензидиновой пероксидазы в ксилеме в июле была самой высокой за весь сезон (рис. 1б). В феврале растения находились в состоянии вынужденного покоя, то есть все изменения в метаболических процессах были обусловлены в первую очередь влиянием внешних факторов, таких как свет и температура. Как во флоэме, так и в ксилеме в этот период активности пероксидаз в реакции окисления бензидина были невысоки (рис. 1б), в то время как активность гваяколовых пероксидаз в тканях ствола была довольно высокой (рис. 1б). Вероятно, у обычной березы повислой в период вынужденного покоя пероксидазы клеточных стенок и вакуолярные пероксидазы, в отличие от цитоплазматических, принимают активное участие в метаболических процессах.

Таким образом, получено, что активность пероксидазы находится в обратной корреляции с ростовыми процессами.

У растений карельской березы активности пероксидаз как в реакции окисления гваякола (рис. 2а), так и в реакции бензидина (рис. 2б) были примерно в 10 раз выше по сравнению с обычной березой повислой. Высокая активность пероксидазы может быть причиной увеличения у карельской березы жесткости структуры клеточной стенки по сравнению с обычной березой, как было показано нами ранее [8].

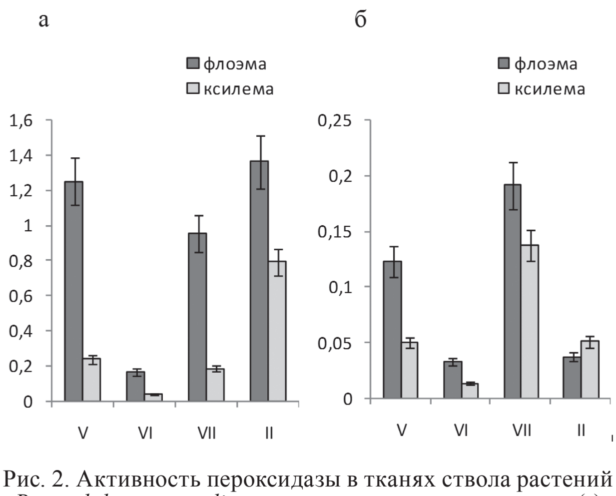


Рис. 2. Активность пероксидазы в тканях ствола растений *B. pendula* var. *carelica* в реакции окисления гваякола (а) и бензидина (б). Обозначения, как на рис. 1

Именно пероксидаза участвует в укреплении клеточной стенки растений путем катализа полимеризации фенольных соединений с образованием лигнина и суберина [19], [23], [25], [31] и их кросс-связывания с такими структурными белками, как экстенсин [18] и гидроксипролинбогатые белки [28].

Еще одна отличительная особенность карельской березы – это существенное возрастание в июле в тканях флоэмы активности всех форм пероксидаз (рис. 2а, б). Повышение пероксидазной активности при торможении камбиального роста у узорчатых растений может быть связано с возрастанием утилизации сахарозы на синтез соединений фенольной природы.

Тот факт, что у обычной березы повислой не происходило возрастания пероксидазной активности в период снижения камбиального роста во флоэме, может свидетельствовать о включении у нее избытка сахаров в другие метаболические процессы. Известно, что хорошим индикатором изменения условий среды является крахмал [11], который может временно депонироваться в растении при избытке метаболитов. Крахмал накапливается в виде слоистых зерен различного размера, и поскольку зерна не могут передвигаться из клетки в клетку, то крахмал обнаруживается именно там, где он синтезируется [10].

В мае – июне в тканях ствола у двух форм березы повислой не обнаруживалось большого количества крахмала (рис. 3). При снижении камбиальной активности у 40-летних растений его количество возрастало у карельской березы во флоэме (рис. 3а), а у обычной березы – во флоэме и ксилеме (рис. 3). Особенно существенное увеличение содержания крахмала происходило во флоэме у обычной березы повислой, его значения достигали 50 мг/г (рис. 3).

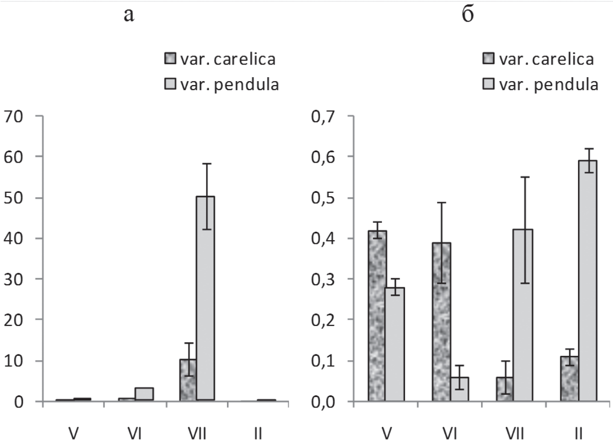


Рис. 3. Содержание крахмала (мг/г сухой ткани) во флоэме (а) и ксилеме (б) у растений березы повислой. По оси абсцисс – время взятия образцов (месяц)

Таким образом, временно образующийся во флоэме избыток метаболитов по причине торможения камбиального роста у обычной березы повислой откладывается в виде крахмала, а у карельской березы, вероятно, идет синтез вторичных метаболитов, в котором пероксидаза принимает активное участие.

Динамика активности пероксидазы в листьях

У 40-летних деревьев березы повислой в июне в листьях, которые выступают в качестве донора вновь синтезированных органических веществ, активность пероксидазы (рис. 4) была значительно ниже, чем в тканях флоэмы и ксилемы (рис. 1а, 2а) в этот период.

Длительное действие высоких температур в июле и отсутствие дождей, приведшее к временному снижению камбиальной активности, не могли не сказаться и на метаболическом статусе листьев. Так, активность фермента в листьях *B. pendula* var. *pendula* снизилась в семь раз, в то время как у *B. pendula* var. *carelica* активность пероксидазы почти не изменилась (рис. 4).

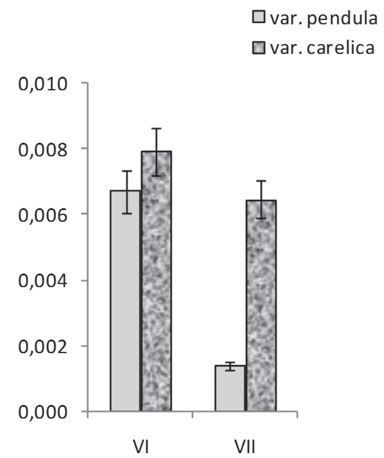


Рис. 4. Активность пероксидазы (образуется мкмоль тетрагваякола на 1 г сырой ткани за минуту) в листьях у растений березы повислой в период активного роста (VI – июнь, VII – июль)

Известно, что при действии неблагоприятных факторов [26], в том числе повышенной температуры [32], [33], в клетках растений развивается окислительный стресс, связанный с повышенной продукцией активных форм кислорода (АФК). Наряду с антиоксидантными ферментами, к которым относится пероксидаза, у растений к важным низкомолекулярным антиоксидантам относятся пигменты [12].

Изучение изменения содержания пигментов в листьях карельской березы показало, что длительное действие высоких температур приводило к снижению суммарного содержания хлорофиллов (*хл a* + *хл b*) (рис. 5а) и каротиноидов (рис. 5б) примерно в 1,5 раза. Следует отметить, что в листьях обычной березы повислой не происходило достоверных изменений в количестве фотосинтезирующих пигментов (рис. 5а, б).

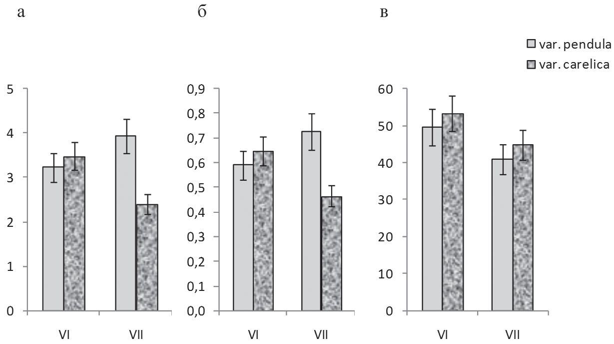


Рис. 5. Содержание хлорофиллов (*хл a + хл b*) (а), каротиноидов (б) (мг/г сухой ткани) и количество пигментов в светособирающем комплексе (%) (в) в листьях растений березы повислой в период активного роста (VI – июнь, VII – июль)

Устойчивость фотосинтетического аппарата растений формируется за счет изменения концентрации и перераспределения зеленых и желтых пигментов в ССК [4]. У обеих форм растений березы повислой к июлю наблюдалось снижение количества хлорофиллов примерно в 1,2 раза по сравнению с июнем в составе ССК (рис. 5в), что в условиях повышенных температур можно рассматривать как адаптивную реакцию, позволяющую избежать фотоингибирования путем уменьшения количества поглощаемого света [9].

Подводя итог, можно заключить, что в ответ на длительное влияние высоких температур на фоне отсутствия дождей, приведшее к торможению камбиального роста ствола, у двух форм березы повислой в листовом аппарате происходили разные изменения. У обычной березы повислой снижение доли хлорофиллов в ССК сопровождалось возрастанием суммы хлорофиллов и содержания каратиноидов при существенном снижении активности пероксидазы. У карельской березы снижение доли хлорофиллов в ССК, наоборот, происходило на фоне снижения содержания пигментов, при этом активность пероксидазы почти не изменялась.

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что в аномальных по строению тканях ствола карельской березы активность пероксидазы значительно превосходит таковую в тканях обычной березы повислой. Наблюдаемые изменения активности фермента на разных фазах развития указывают на его активное участие в метаболических процессах и свидетельствуют о перспективности выбранного направления исследований. Настоящую работу можно рассматривать как первое приближение к пониманию функциональной роли пероксидазы в процессах, предшествующих и сопровождающих нарушение морфогенеза у древесных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Галибина Н. А., Зыкина Н. С., Плясунова Л. Ю., Романова М. И. Взаимодействие цинк-тетрафенилпорфина, бромистого пропаргила и пероксидазы хрена с анилинами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 7–15.
2. Андреев И. М. Функции вакуоли в клетках высших растений // Физиология растений. 2001. Т. 48. С. 777–778.
3. Андреева В. А. Фермент пероксидаза: участие в защитном механизме растений. М.: Наука, 1988. 129 с.
4. Бухов Н. Г. Динамическая световая регуляция фотосинтеза // Физиология растений. 2004. Т. 51. С. 825–837.
5. Гавриленко В. Ф., Жигалова Т. В. Большой практикум по фотосинтезу. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 256 с.
6. Газарян И. Г., Хушпульян Д. М., Тишков В. И. Особенности структуры и механизма действия пероксидазы растений // Успехи биологической химии. 2006. Т. 46. С. 303–322.
7. Галибина Н. А., Красавина М. С., Новицкая Л. Л., Софронова И. Н. Ферменты метаболизации сахарозы при формировании аномалий карельской березы // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды: Материалы междунар. конф. Петрозаводск: Карельский научный центра РАН, 2011. С. 79–84.
8. Галибина Н. А., Теребова Е. Н. Свойства клеточных оболочек тканей ствола *Betula pendula* Roth // Дендроэкология и лесоведение: Материалы всероссийской конф. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 32–35.
9. Дымова О. В., Гриб И., Головко Т. К., Стржалка К. Состояние пигментного аппарата зимне- и летнезеленых листьев теневыносливого растения *Ajuga reptans* // Физиология растений. 2010. Т. 57. С. 809–818.
10. Кретович В. Л. Биохимия растений. М.: Высш. шк., 1986. 503 с.
11. Новицкая Ю. Е. Особенности физиолого-биохимических процессов в хвое и побегах ели в условиях Севера. Л.: Наука, 1985. 116 с.
12. Полесская О. Г., Каширина Е. И., Алехина Н. Д. Изменение активности антиоксидантных ферментов в листьях и корнях пшеницы в зависимости от формы и дозы азота в среде // Физиология растений. 2004. Т. 51. С. 686–691.
13. Попов В. К., Авраменко Р. С., Филоненко Е. В. Способ диагностики узорчатой древесины карельской березы // Описание изобретения к патенту Российской Федерации. 1996. № 2063679.
14. Рогожин В. В. Пероксидаза как компонент антиоксидантной системы живых организмов. СПб.: ГИОРД, 2004. 240 с.
15. Черепанова Е. А. Хитин-специфичные пероксидазы растений: Дис. … канд. биол. наук. Уфа, 2005. 275 с.
16. Шарова Е. И. Клеточная стенка растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 156 с.
17. Borchert R. Time course and spatial distribution of phenylalanine ammonia lyase and peroxidase activity in wounded potato tuber tissue // Plant Physiol. 1978. Vol. 62. P. 789–793.
18. Brownleader M. D., Hopkins J., Mobasheri A. et al. Role of extension peroxidase in tomato (*Lycopercicon esculentum* Mill.) seedling growth // Planta. 2002. Vol. 210. P. 668–676.

19. Dehon L., Macheix J. J., Durand M. Involvement of peroxidases in the formation of the brown coloration of heartwood in *Juglans nigra* // Journal of Experimental Botany. 2002. Vol. 53. P. 303–311.
20. Donaldson L. A. Lignification and lignin topochemistry – an ultrastructural view // Phytochem. 2001. Vol. 57. P. 859–873.
21. Fry S. C. Phenolic components of the primary cell wall and their possible role in the hormonal regulation of growth // Planta. 1979. Vol. 146. P. 343–351.
22. Gove J. P., Hoyle M. C. The isozymic similarity of indoleacetic acid oxidase to peroxidase in bich and horseradish // Plant Physiol. 1975. Vol. 56. P. 684–687.
23. Hawkins S., Boudet A. Defense lignin and hydroxycinnamyl alcohol dehydrogenase activities in wounded Eucalyptus gunnii // Forest Path. 2003. Vol. 33. P. 91–104.
24. Jansen M. A. K., Van den Noort R. E., Tan M. Y. et al. Phenol-oxidizing peroxidases contribute to the protection of plants from ultraviolet radiation stress // Plant Physiol. 2001. Vol. 126. P. 1012–1023.
25. Kawano T. Roles of the reactive oxygen species-generating peroxidase reactions in plant defense and growth induction // Plant Cell Rep. 2003. Vol. 21. P. 829–837.
26. Kuzniak E. Transgenic plants: an insight into oxidative stress tolerance mechanisms // Acta physiol. Plant. 2002. Vol. 24. P. 97–113.
27. Lichtenthaler H. K. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants // J. Plant Physiol. 1996. Vol. 148. P. 4–14.
28. McDougall G. J. Cell-wall proteins from Sitka spruce xylem are selectively insolubilised during formation of dehydrogenation polymers of coniferyl alcohol // Phytochem. 2001. Vol. 57. P. 157–163.
29. Pucher G. W., Leavenworth C. S., Vickery H. B. Determination of starch in plant tissues // Analyt. Chem. 1948. Vol. 20. P. 850–853.
30. Rizhsky L., Hallak-Herr E., Van Breusegem F. et al. Double antisence plants lacking ascorbate peroxidase and catalase are less sensitive to oxidative stress than single antisense plants lacking ascorbate peroxidase or catalase // Plant J. 2002. Vol. 32. P. 329–342.
31. Wallace G., Fry S. C. Action of diverse peroxidases and laccases on six wall-related phenolic compounds // Phytochemistry. 1999. Vol. 52. P. 769–773.
32. Zang J., Kirkham M. B. Drought-stress induced changes in activities of superoxide dismutase, catalase and peroxidase in wheat species // Plant cell physiol. 1994. Vol. 35. P. 785–791.
33. Zhang J., Kirkham M. B. Enzymatic Responses of the Ascorbate-Glutathione Cycle to Drought in Sorghum and Sunflower Plants // Plant Sci. 1996. Vol. 113. P. 139–147.

Galibina N. A., Forest Research Institute, Karelian Research Cenrtre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Tselishcheva Yu. L., Forest Research Institute, Karelian Research Cenrtre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Andreev V. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Sofronova I. N., Forest Research Institute, Karelian Research Cenrtre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Nikerova K. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

PEROXIDASE ACTIVITY IN ORGANS AND TISSUES OF SILVER BIRCH TREES

Silver birch trees with different degrees of manifestation of wood grain patterns were studied to reveal acid and alkaline peroxidase activity in the phloem and xylem parts of the cambial zone during the trees' growing season. Peroxidase activity in the phloem tissues of both types of silver birch was elevated in xylem tissues. Correlations between peroxidase activity and intensity of the cambial growth were negative. In June, when growth processes commenced in the trunk, peroxidase activity dropped significantly when compared to data obtained in May. At this time, cambium was not yet active. Later in July, a prolonged high temperature period resulted in substantial inhibition of cambial activity. Peroxidase activity in both acid and alkaline forms of the enzymes rose during this period both in xylem and in phloem tissues. High enzyme activity was found only in tissues of curly-grained trunks. Peroxidase activity in straight-grained plants did not change. Possible pathways of peroxidase involvement in the processes of abnormal morphogeny of woody plants are discussed.

Key words: *Betula pendula* Roth, curly birch, peroxidase, starch, pigments

REFERENCES

1. Andreev V. P., Sobolev P. S., Zaitsev D. O., Galibina N. A., Zykina N. S., Plyasunova L. Yu., Romanova M. I. Interaction of zinc-tetraphenylporphyn, propapgyl bromide and horseradish peroxidase with anilines [Vzaimodeystvie tsink-tetrafenilporfina, bromistogo propargila i peroksidazy khrena s anilinami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudastvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University, Natural & Engineering Sciences]. 2011. № 6 (119). P. 7–15.
2. Andreev I. M. Function of the vacuole in higher plant cells [Funktsii vakuoli v kletkakh vysshikh rasteniy]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2001. Vol. 48. P. 672–680.
3. Andreeva V. A. *Ferment peroksidaza: uchastie v zashchitnom mekhanizme rasteniy* [Ferment peroxidase: participation in preservative mechanism of plants]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 129 p.
4. Bukhov N. G. Dynamic light regulation of photosynthesis (a review) [Dinamicheskaya svetovaya regulyatsiya fotosinteza]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2004. Vol. 51. P. 742–753.
5. Gavrilenko V. F., Zhigalova T. V. *Bol'shoy praktikum po fotosintezu* [Big practicum of photosynthesis]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2003. 256 p.
6. Gazaryan I. G., Khushpul'yan D. M., Tishkov V. I. Peculiarities of structure and mechanism of action of peroxidase of plants [Osobennosti struktury i mekhanizma deystviya peroksidazy rasteniy]. *Uspekhi biologicheskoy khimii* [Biological chemistry reviews]. 2006. Vol. 46. P. 303–322.
7. Galibina N. A., Krasavina M. S., Novitskaya L. L., Sofronova I. N. Enzymes of sucrose metabolisation during formation of abnormalities in curly birch [Fermenty metabolizatsii sakharozy pri formirovanii anomaliy karel'skoy berezy]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Strukturnye i funktsional'nye otkloneniya ot normal'nogo rosta i razvitiya*

rasteniy pod vozdeystviem faktorov sredy" [Material of international conference "Structural and functional deviations from normal growth and development of plants under the influence of environmental factors"]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS, 2011. P. 79–84.
8. Galibina N. A., Terebova E. N. Characterization of cell wall in trunk tissues of *Betula pendula* Roth [Svoystva kletochnykh obolochek tkaney stvola *Betula pendula* Roth]. *Materialy vserossiyskoy konferentsii "Dendroekologiya i lesovedenie"* [Materialy of national conference "Dendrology and silvics"]. Krasnoyarsk, Institut lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN, 2007. P. 32–35.
9. Dymova O. V., Grib I., Golovko T. K., Strzhalka K. Characterization of pigment apparatus in winter-green and summer-green leaves of a shade-tolerant plant *Ajuga reptans* [Sostoyanie pigmentnogo apparata zimne- i letnezelenykh list'ev tenevynoslivogo rasteniya *Ajuga reptans*]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2010. Vol. 57. P. 755–763.
10. Kretovich V. L. *Biokhimiya rasteniy* [Biochemistry of plants]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986. 503 p.
11. Novitskaya Yu. E. *Osobennosti fiziologo-biokhimicheskikh protsessov v khvoe i pobegakh eli v usloviyakh Severa* [Physiological and biochemical processes in spruce needle and shoots in conditions of the North]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 116 p.
12. Polesskaya O. G., Kashirina E. I., Alekhina N. D. Changes in the activity of antioxidant enzymes in wheat leaves and roots as a function of nitrogen source and supply [Izmenenie aktivnosti antioksidantnykh fermentov v list'yakh i kornyakh pshenitsy v zavisimosti ot formy i dozy azota v srede]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2004. Vol. 51. P. 615–620.
13. Popov V. K., Avramenko R. S., Filonenko E. V. *Sposob diagnostiki uzorchatoy drevesiny karel'skoy berezy* [Diagnostics of curly birch trees with figured and straight grain]. Patent RF, № 2063679, 1996.
14. Rogozhin V. V. *Peroksidaza kak komponent antioksidantnoy sistemy zhivykh organizmov* [Peroxidase – component of antioxidant system of organisms]. St. Petersburg, GIORD Publ., 2004. 240 p.
15. Cherepanova E. A. *Khitin-spetsifichnye peroksidazy rasteniy. Diss. kand. biol. nauk* [Chitin-specific peroxidase of plant. Cand. biol. sci. diss.]. Ufa, 2005. 275 p.
16. Sharova E. I. *Kletochnaya stenka rasteniy* [Cell wall of plant]. St. Petersburg, SPbGU Publ., 2004. 156 p.
17. Borchert R. Time course and spatial distribution of phenylalanine ammonia lyase and peroxidase activity in wounded potato tuber tissue // Plant Physiol. 1978. Vol. 62. P. 789–793.
18. Brownleader M. D., Hopkins J., Mobasheri A. et al. Role of extension peroxidase in tomato (*Lycopercicon esculentum* Mill.) seedling growth // Planta. 2002. Vol. 210. P. 668–676.
19. Dehon L., Macheix J. J., Durand M. Involvement of peroxidases in the formation of the brown coloration of heartwood in *Juglans nigra* // Journal of Experimental Botany. 2002. Vol. 53. P. 303–311.
20. Donaldson L. A. Lignification and lignin topochemistry – an ultrastructural view // Phytochem. 2001. Vol. 57. P. 859–873.
21. Fry S. C. Phenolic components of the primary cell wall and their possible role in the hormonal regulation of growth // Planta. 1979. Vol. 146. P. 343–351.
22. Gove J. P., Hoyle M. C. The isozymic similarity of indoleacetic acid oxidase to peroxidase in bich and horseradish // Plant Physiol. 1975. Vol. 56. P. 684–687.
23. Hawkins S., Boudet A. Defense lignin and hydroxycinnamyl alcohol dehydrogenase activities in wounded Eucalyptus gunnii // Forest Path. 2003. Vol. 33. P. 91–104.
24. Jansen M. A. K., Van den Noort R. E., Tan M. Y. et al. Phenol-oxidizing peroxidases contribute to the protection of plants from ultraviolet radiation stress // Plant Physiol. 2001. Vol. 126. P. 1012–1023.
25. Kawano T. Roles of reactive oxygen species generating peroxidase reactions in plant defense and growth induction // Plant Cell Rep. 2003. Vol. 21. P. 829–837.
26. Kuzniak E. Transgenic plants: an insight into oxidative stress tolerance mechanisms // Acta physiol. Plant. 2002. Vol. 24. P. 97–113.
27. Lichtenthaler H. K. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants // J. Plant Physiol. 1996. Vol. 148. P. 4–14.
28. McDougall G. J. Cell-wall proteins from Sitka spruce xylem are selectively insolubilised during formation of dehydrogenation polymers of coniferyl alcohol // Phytochem. 2001. Vol. 57. P. 157–163.
29. Pucher G. W., Leavenworth C. S., Vickery H. B. Determination of starch in plant tissues // Analyt. Chem. 1948. Vol. 20. P. 850–853.
30. Rizhsky L., Hallak-Herr E., Van Breusegem F. et al. Double antisence plants lacking ascorbate peroxidase and catalase are less sensitive to oxidative stress than single antisense plants lacking ascorbate peroxidase or catalase // Plant J. 2002. Vol. 32. P. 329–342.
31. Wallace G., Fry S. C. Action of diverse peroxidases and laccases on six wall-related phenolic compounds // Phytochemistry. 1999. Vol. 52. P. 769–773.
32. Zang J., Kirkham M. B. Drought-stress induced changes in activities of superoxide dismutase, catalase and peroxidase in wheat species // Plant cell physiol. 1994. Vol. 35. P. 785–791.
33. Zhang J., Kirkham M. B. Enzymatic Responses of the Ascorbate-Glutathione Cycle to Drought in Sorghum and Sunflower Plants // Plant Sci. 1996. Vol. 113. P. 139–147.

Поступила в редакцию 28.03.2013

Июнь, № 4 **Биология** **2013**

УДК 639.309

ИРИНА НИКОЛАЕВНА ЗАЛИЧЕВА
доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией экологической токсикологии и биомониторинга Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
Izalicheva@research.karelia.ru

ВАЛЕНТИНА СЕВЕРЬЯНОВНА ГАНИНА
научный сотрудник лаборатории экологической токсикологии и биомониторинга Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ganina@research.karelia.ru

ЗОНАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ К АНТРОПОГЕННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

Необоснованное применение общефедеральных рыбохозяйственных предельно допустимых концентраций в 5 различных природно-климатических зонах России неизбежно влечет за собой экологические ошибки, особенно на водоемах северных регионов с их пониженной биологической и гидрохимической забуференностью. Целью нашей работы являлось выявление зональных закономерностей и особенностей устойчивости пресноводных экосистем к антропогенному загрязнению. Исследования влияния факторов водной среды на токсичность солей металлов, нефтепродуктов и пестицидов, проведенные нами в трех регионах (Южный Урал, Восточно-Казахстанская область и Карелия), позволили установить достоверную связь токсикорезистентности представительных гидробионтов и токсичности поллютантов различной химической природы с гидрохимическим режимом и трофическим статусом водоемов. В частности, регрессионный анализ экспериментальных данных показал, что при увеличении с севера на юг значений фоновых характеристик водной среды (минерализация, жесткость, катионный и анионный состав, содержание хлорофилла и т. д.) для гидробионтов закономерно снижается токсичность меди, никеля, цинка, свинца и калия в остро- и хронически летальных концентрациях. Выявленные качественные и количественные отличия устойчивости водных экосистем различных природно-климатических зон к антропогенному загрязнению однозначно свидетельствуют о биологической нецелесообразности и экологической опасности системы единых токсикологических регламентов без учета зональной биотической и абиотической забуференности пресноводных водоемов.

Ключевые слова: водные экосистемы, антропогенное загрязнение, резистентность, абиотические и биотические факторы, зональность, рыбохозяйственные предельно допустимые концентрации, экологическое нормирование

Исследованиями школы М. М. Камшилова [7] показано, что в основе резистентности экосистем к загрязнению лежат их абиотические и биотические буферные свойства. К биотическим факторам забуференности относятся прежде всего класс токсобности популяций представительных гидробионтов, трофическая структура биоценоза и способность к самоочищаемости. Ведущие абиотические факторы – гидрохимический класс и группа поверхностных вод, минерализация и жесткость, pH, наличие комплексующих и сорбирующих компонентов и т. д. Ярко выраженный зональный характер большинства перечисленных факторов определяет эволюцию водных экосистем, их функционирование, а следовательно, и токсикорезистентность [6], [8].

В то же время действующая в России нормативная база регламентирования антропогенной токсикологической нагрузки на водоемы основана на общефедеральных рыбохозяйственных предельно допустимых концентрациях (ПДК), которые не учитывают особенности устойчивости к загрязнению пресноводных экосистем, расположенных в различных природно-климатических зонах. Игнорирование поливалентного характера буферности водоемов, сведение ее к одному-двум не всегда ведущим параметрам влечет за собой методологическую и методическую ошибку при постановке токсикологических экспериментов, а также при экстраполяции полученных в лаборатории выводов на все природное многообразие водных экосистем [1], [2], [4], [9], [12], [13]. В связи с этим разработка экологического подхода к нормированию и контролю антропогенной нагрузки на водные объекты является актуальной природоохранной проблемой, прежде всего для северных регионов с пониженной биологической и гидрохимической забуференностью.

В настоящей работе приведены результаты наших многолетних полевых и лабораторных исследований влияния гидрохимического режима и трофического статуса водоемов различных природно-географических зон на токсикорезистентность представительных гидробионтов и токсичность поллютантов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

При проведении токсикологических экспериментов применяли стандартные методики [11]. В острых опытах наряду с традиционным определением LT50 (время гибели 50 % подопытных в остролетальных концентрациях) широко использовали метод ступенчатой нагрузки: критерием устойчивости гидробионтов и токсичности реагентов служила критическая токсикологическая нагрузка, вызывающая гибель 50 % организмов в опыте (КТН50), равная сумме произведений заданных концентраций токсиканта на время экспозиции в них.

В хронических экспериментах определяли пороговую концентрацию (ПК), обусловливающую отклонение параметра от контрольного уровня на 20 %. Статистическую обработку материала проводили стандартными методами с использованием корреляционного и регрессионного анализа [5].

Исследования проведены в регионе Карелии, Южного Урала и Восточно-Казахстанской области (ВКО). В качестве фоновой среды в экспериментах использовали воду из 24 водоемов Южного Урала, расположенных в среднегорном лесостепном и степных районах Башкирии и Челябинской области, 24 водоемов ВКО (зона горной тайги, лесостепи и степи) и 6 водоемов Карелии (зона северной тайги).

Основным тест-объектом на Южном Урале и в ВКО служили представительные для региона гаммариды (*Gammarus lacustris* L.) – олиготоксобный, широко распространенный вид. В Карелии использованы индикаторные и представительные для региона гидробионты: лабораторные культуры (*Scenedesmus quadricauda* Turp Breb, *Daphnia magna* Straus) и рыбы (*Coregonus lavaretus* L. и *Salmo irideus* Gib.) в период раннего онтогенеза.

В качестве тест-реагентов были взяты сульфат меди, никеля, цинка и калия, нитрат свинца, нефтепродукты (солярка и бензин А-76), сельскохозяйственные пестициды – ДДВФ (диметилдихлорвинилфосфат) и прометрин (2-метилтио-4,6, бис (изопропиламино) – 1,3,5симтриазин). О степени стабильности реагентов в водной среде судили по коэффициенту персистентности (Кп), равному отношению конечной и начальной токсичности растворов по LT50 при экспозиции 30 суток. Тестирование в Карелии проводили на дафниях, в других регионах – на гаммаридах.

Гидрохимические исследования в Карелии выполнены лабораториями гидрохимии Института водных проблем Севера (ИВПС) КарНЦ РАН и Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства ПетрГУ, в других регионах – центральными геохимическими лабораториями соответствующих базовых предприятий цветной металлургии по стандартным методикам [10]. Анализ проб хлорофилла проведен в ИВПС КарНЦ РАН по общепринятой методике [14]. Для расчета по уравнениям регрессии токсикометрических параметров металлов использованы значения разных уровней минерализации, содержания хлорофилла, магния и сульфатов, соответствующие средним показателям различных типов и классов озер по классификации С. П. Китаева [8] и ГОСТ 17.1.2.04-77 [3].

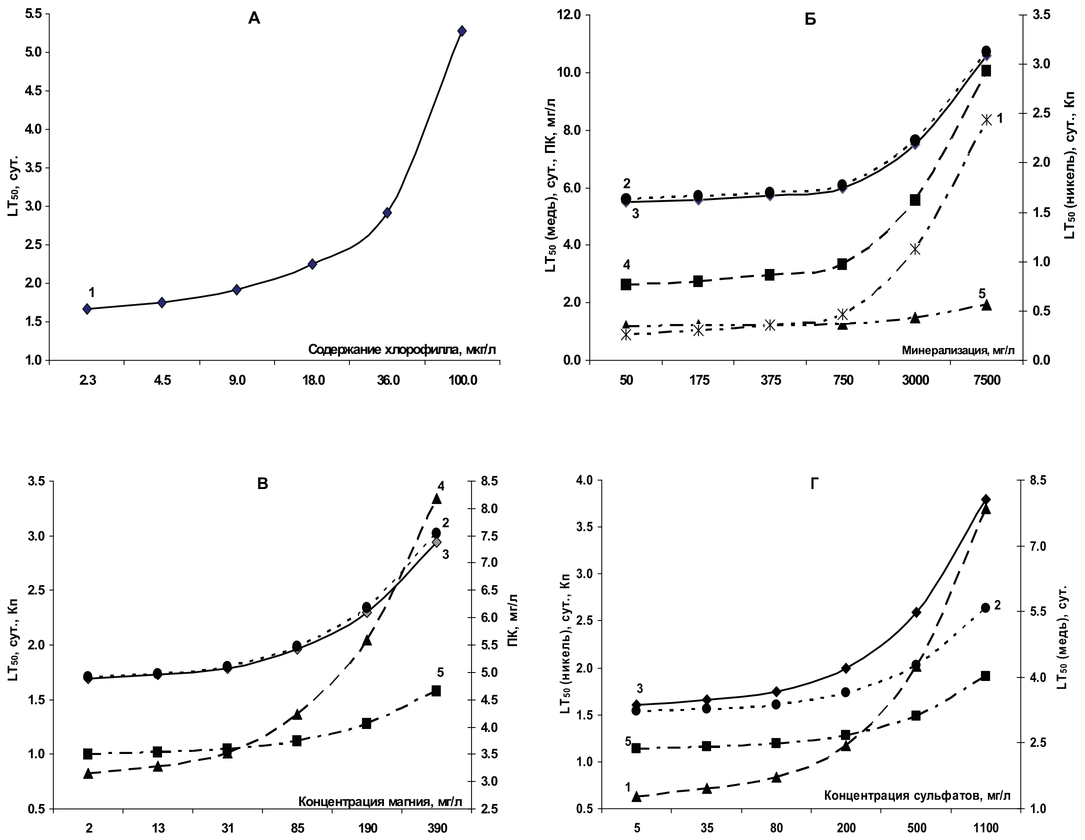
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Россия обладает огромным фондом водоемов, расположенных в разных природно-климатических зонах – от тундры до степи и полупустыни, что обусловливает их разнокачественность, в том числе и по устойчивости к токсикологической нагрузке. Значительные отличия по гидрохимическим и трофическим параметрам озер и рек Южного Урала, Восточно-Казахстанской области и Карелии позволили нам достаточно полно изучить зональные особенности токсикорезистентности пресноводных экосистем к антропогенному загрязнению.

По минерализации обследованные водоемы входили в диапазон от ксеногалобных до полигалобных, с водой от очень мягкой до очень жесткой и pH от нормальной до щелочной, по перманганатной окисляемости – от ксеносапробных до полисапробных, по содержанию хлорофилла на период исследований – от олиготрофного до эвтрофного типа.

Результаты токсикометрии реагентов, проведенной на Урале и в Восточно-Казахстанской области, свидетельствуют о существенном влиянии качества фоновой среды на токсичность соединений металлов, пестицидов и нефтепродуктов для гаммарид. Так, например, в регионе Южного Урала максимальные различия по LT50 составляют для никеля 7 раз, меди – 217, свинца – 42, прометрина – 5,5 раза; по Кп для никеля – 25, меди – 20, свинца – 55, прометрина – 27 и бензина – 42 раза. В регионе ВКО на разных фоновых средах величина КТН50 цинка максимально отличается в 6 раз, а различия по Кп достигают для меди 170, цинка – 29, свинца – 19, калия и солярки – 17 и ДДВФ – 250 раз.

Корреляционный анализ экспериментальных данных показал, что все исследованные параметры фоновой среды в той или иной степени ста-



Влияние хлорофилла (**А**) и гидрохимических показателей водной среды (**Б**, **В** и **Г**) на токсикометрические параметры металлов для *Gammarus lacustris* из оз. Карагайского (регион Южного Урала)

тистически достоверно влияют на токсичность различных реагентов. Если суммарное число исследованных токсикометрических параметров по всем реагентам принять за 100 % и рассчитать частоту статистически достоверного воздействия на их величину показателей водной среды, получаются следующие ряды факторов по их значимости в определении токсичности поллютантов.

Водоемы Южного Урала

Минерализация (54 %) = Mg^{2+} (54 %) > жесткость (46 %) = SO_4^{2-} (46 %) = $Na^+ + K^+$ (46 %) > Cl^- (39 %) > ПО (31 %) > HCO_3^- (23 %) = Ca^{2+} (23 %) > pH (15 %) > хлорофилл (8 %) = CO_3^{2-} (8 %).

Водоемы Восточно-Казахстанской области

Минерализация (57 %) = жесткость (47 %) > хлорофилл (33 %) = Mg^{2+} (33 %) = HCO_3^- (33 %) > Cl^- (22 %) = SO_4^{2-} (22 %) = Ca_2+ (22 %) > pH (0 %).

В обоих регионах минерализация и жесткость поверхностных вод являются ведущими параметрами, обусловливающими уровень токсичности большинства исследованных реагентов, при этом токсичность металлов в большей степени зависит от фоновых характеристик водной среды, чем нефтепродуктов и пестицидов.

Парный регрессионный анализ опытных данных позволил получить целый ряд достоверных уравнений зависимости токсикометрических параметров реагентов от гидрохимических показателей и содержания суммарного хлорофилла в водной среде ($p \leq 0{,}05$). На примере металлов мы рассчитали их токсичность при разных уровнях минерализации, содержания хлорофилла, концентрации магния и сульфатов, соответствующих средним значениям различных типов и классов озер. Как видно из данных, представленных на рисунке, при увеличении величин фоновых характеристик водной среды закономерно повышаются все токсикометрические параметры меди и никеля, то есть их токсичность при остром и хроническом воздействии (по LT50 и ПК) для гаммарид Южного Урала снижается. Увеличение Кп также указывает на понижение токсичности металлов по мере возрастания фоновых показателей.

Если сравнить минимальные и максимальные значения исследованных параметров, то видно, что острая токсичность меди от олиго- до политрофных вод (по содержанию хлорофилла) снижается в 3,2 раза. По гидрохимическим показателям получаются следующие ряды снижения токсичности.

Минерализация (класс вод от ультрапресных до среднесолоноватых)

Медь, LT_{50} (9,2 раза) > никель, ПК (3,8 раза) > никель, LT_{50} (1,9 раза) = медь, Кп (1,9 раза) > никель, Кп (1,6 раза).

Таблица 1

Сравнительная токсикорезистентность модельных популяций *D. magna* к металлам (пороговая концентрация, мг/л)

Популяция дафний	Никель				Медь			
	1	2	3	5	1	2	3	4
Лабораторная	–	0,58	0,29	0,063	–	0,009	0,062	–
Прудовая	–	0,15	0,50	0,059	–	0,170	–	0,19
Уелгинская	0,23	–	–	–	0,076	–	–	–

Примечание. Опытная фоновая среда: 1 – оз. Уелги, 2 – оз. Тургояк, 3 – оз. Карагайское, 4 – Татаркин пруд, 5 – Онежское озеро; прочерк – отсутствие данных.

Концентрация магния (от ксеногалобного до α-мезогалобного класса вод)

Никель, ПК (2,6 раза) > медь, Кп (1,8 раза) > никель, LT_{50} (1,7 раза) > никель, Кп (1,6 раза).

Концентрация сульфатов (от ксеногалобного до α-мезогалобного класса вод)

Медь, LT_{50} (6,1 раза) > никель, LT50 (2,4 раза) > медь, Кп (1,7 раза) = никель, Кп (1,7 раза).

В целом токсичность меди в большей степени зависит от фоновых характеристик водной среды, чем токсичность никеля, при этом для обоих металлов наибольший эффект снижения токсичности наблюдается при увеличении минерализации.

В результате расчета по уравнениям регрессии параметров токсичности металлов для представительных гаммарид ВКО выявлены аналогичные закономерности. При этом от олиготрофных до β-эвтрофных вод (по хлорофиллу) токсичность свинца и калия (по Кп) снижается в 7,8 и 13,7 раза соответственно, а токсичность цинка (по $КТН_{50}$) – в 8,4 раза. При увеличении минерализации от 50 до 3000 мг/л, что соответствует по классификации С. П. Китаева [8] ультрапресному и солоноватоводному классу вод, токсичность цинка по КТН50 уменьшается в 10 раз. Повышение концентрации магния от 2 до 190 мг/л и сульфатов от 5 до 500 мг/л (класс вод по ГОСТ 17.1.2.04-77 от ксеногалобного до β-мезогалобного) приводит к снижению токсичности цинка по параметру $КТН_{50}$ в 5,3 раза, по коэффициенту персистентности (Кп) – в 6,6 и 12,5 раза соответственно. Приведенные данные однозначно свидетельствуют о статистически существенной и биологически значимой зависимости токсичности металлов для гидробионтов как от трофического статуса водоемов, определяемого нами по суммарному содержанию хлорофилла, так и от всего комплекса исследованных гидрохимических показателей водной среды.

В специальных модельных экспериментах, проведенных в регионе Южного Урала, при экспозиции 30 суток была исследована токсикорезистентность *D. magna* к металлам трех популяций (лабораторная, привезенная из Петрозаводска; прудовая, выловленная из водоема Татаркин пруд, и уелгинская – из оз. Уелги) на различных по гидрохимическим показателям фоновых средах (табл. 1).

Межпопуляционные различия в устойчивости дафний к хронической медной интоксикации составили 2,8 раза, к хронической интоксикации никелем – 9,8 раза, а внутрипопуляционные, в зависимости от фоновых характеристик опытной среды, – 7,0 и 9,2 раза соответственно. Это еще раз подтверждает вывод о том, что токсичность поллютантов для гидробионтов обусловливается не только их нормой реакции, но и всем гидрохимическим комплексом водоема.

Изучение стабильности (персистентности) загрязняющих веществ в водной среде представляет для нас особый интерес, так как позволяет в первом приближении оценить способность водоемов к самоочищению. Анализ результатов 88 экспериментов, проведенных в регионе Карелии с использованием воды из 6 водоемов, различающихся (в пределах зоны тайги) по химическому составу и трофическому статусу, показал, что даже в узком диапазоне изменения химических параметров и содержания хлорофилла в фоновой среде Кп для исследованных веществ колеблется в достаточно широких пределах: для меди – в 2,6 раза, цинка – до 45, никеля – до 8, свинца – до 68, солярки – до 10, прометрина – до 20, ДДВФ – до 17 раз. Установлено также, что ПК токсикантов зависит не только от фоновых

Таблица 2

Влияние гидрохимического класса водной среды на хроническую токсичность тест-реагентов для *D. magna* (экспозиция 30 суток)

Гидрохимический класс вод	Пороговая концентрация, мг/л							
	Медь	Цинк	Свинец	Никель	Солярка	Бензин А-76	ДДВФ	Прометрин
Гидрокарбонатный	0,0100	0,050	1,82	0,069	7,80	324	0,00020	1,38
Сульфатный	0,0004	0,010	0,09	0,052	0,26	166	0,00001	0,29
Хлоридный	0,0040	0,004	2,00	0,038	1,20	65	0,00001	0,33

характеристик водоемов, но и от тест-объекта. Так, ПК никеля для сценедесмуса изменяется на разных фонах в 2,3 раза, для рыб – в 1,8, для дафний – в 24,6 раза; бензина для сценедесмуса – в 1,3 раза, для рыб – в 8,7, для дафний – в 1645 раз; прометрина для сценедесмуса – в 25 раз, для сига – в 7,8, для форели – в 26,7, для дафний – в 400 раз.

В хронических экспериментах на *D. magna* изучено влияние гидрохимического класса вод на ПК реагентов. Модельные фоновые среды создавали добавлением гидрокарбоната, сульфата и хлорида натрия к воде из оз. Урозера до общей минерализации 200 мг/л. Предварительные методические исследования показали, что данный уровень минерализации позитивно воздействует на биологию популяции дафний. Полученные результаты указывают на существенную зависимость токсичности веществ различной природы от анионного состава среды, причем эта зависимость неодинакова для изученных реагентов (табл. 2).

Следовательно, при разработке токсикологических нормативов целесообразно учитывать химический класс фоновой среды, имеющий достаточно выраженный зональный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Со времен А. Гумбольдта для решения общепланетарных аспектов эволюции, в том числе биосферы Земли, применялся сравнительно-географический метод. В наших исследованиях априори плодотворно было использование метода сравнения зональных особенностей пресноводных водоемов. При всем разнообразии подходов к этой проблеме нам неизвестно ни одного исследования, в котором бы утверждалось отсутствие межзонального вектора устойчивости экосистем. Кардинальные различия между интегральными показателями функционирования водных экосистем от зоны тундры до степи должны обусловливать отличия в их устойчивости по отношению к экстремальному изменению абиотических и биотических факторов среды, в том числе к антропогенному загрязнению.

В нашей работе представлены данные, свидетельствующие о значимой корреляции токсичности для представительных гидробионтов Южного Урала, Восточно-Казахстанской области и Карелии веществ самой разной химической природы (соединения металлов, пестициды, нефтепродукты) с гидрохимическим режимом (класс вод, минерализация, жесткость, pH, перманганатная окисляемость и т. д.) и трофическим статусом водоема, определяемого по содержанию хлорофилла, а также нормы реакции гидробионтов, формирование которой тесно связано со средой обитания. Регрессионный анализ результатов исследований также показал достоверную зависимость от качества фоновой среды пороговой концентрации поллютантов, критической токсикологической нагрузки, коэффициента персистентности.

Таким образом, мы однозначно приходим к выводу об экологической целесообразности регионального регламентирования антропогенного загрязнения пресноводных экосистем с учетом зональных особенностей их биотической и абиотической забуференности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков И. В., Заличева И. Н., Шустова Н. К., Ильмаст Т. Б. Есть ли экологический смысл у системы общефедеральных рыбохозяйственных ПДК? // Экология. 1996. № 5. С. 350–355.
2. Горбачев С. А. Методология и практика оценки ущерба водным биоресурсам от хозяйственной деятельности / Под ред. Д. Э. Ивантера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 383 с.
3. ГОСТ 17.1.2.04-77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов: Утв. Гос. ком. стандартов Совета Министров СССР 23.05.77. М., 1977. 17 с.
4. Заличева И. Н., Ганина В. С., Шустова Н. К. Эколого-токсикологические аспекты устойчивости гидробионтов таежной природно-климатической зоны к закислению водной среды // Экология. 2006. № 1. С. 64–69.
5. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.
6. Исаков Ю. А., Казанская Н. С., Тишков А. А. Зональные закономерности динамики экосистем. М.: Наука, 1986. 150 с.
7. Камшилов М. М. Эволюция биосферы. М.: Наука, 1979. 256 с.
8. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 395 с.
9. Лукьяненко В. И. Экологические аспекты регламентирования антропогенного загрязнения водоемов России // Экологические аспекты регламентирования антропогенного загрязнения водоемов России (региональные ПДК). Ярославль: ВВО РЭА, 1998. С. 37–62.
10. Лурье Ю. Ю. Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1973. 376 с.
11. Методические указания по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды и водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение: Утв. 27.03.98. М.: ВНИРО, 1998. 145 с.
12. Моисеенко Т. И. Водная экотоксикология: Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука, 2009. 400 с.
13. Никаноров А. М., Жулидов А. В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 312 с.
14. Scor-UNESCO, Working group 17, Determination of photosynthesic pigmente in seewater. Paris: UNESCO, 1960. 69 p.

Zalicheva I. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ganina V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ZONAL FACTORS OF FRESH WATER ECOSYSTEMS' RESISTANCE TO ANTHROPOGENIC POLLUTION

Unreasonable application of unified federal maximum allowable concentration values for fisheries in five different natural-climatic zones of Russia is known to entail unpredictable ecological failure, especially in northern water basins characterized by low biological and hydro chemical buffering capacity. The purpose of the study was to identify zonal regularities and specific features of the freshwater ecosystems' resistance to anthropogenic pollution. The study of the aquatic habitat factors' effect on the toxicity of metal salts, oil products, and pesticides was conducted in three regions (Southern Urals, East-Kazakhstan Province, and Karelia). It helped to establish an existing connection of toxic resistance of representative hydrobionts and toxicity of pollutants of different chemical nature with hydrochemical regime and trophic status of the water bodies. Particularly, regression analysis of experimental data demonstrated that with the increase of the values of aquatic habitat background features from north to south etc. the toxicity of copper, nickel, zinc, lead, and potassium in acute and chronic lethal concentrations consistently diminishes. The detected qualitative and quantitative differences in resistance of aquatic ecosystems, belonging to different natural-climatic zones, to anthropogenic pollution strongly indicate biological inexpediency and ecological danger of the applied system. Unified toxicological regulations inherent to the system are harmful when used without necessary consideration of biotic and abiotic buffering of freshwater bodies.

Key words: water ecosystem, anthropogenic pollution, resistance, abiotic and biotic factors, zonality, fisheries maximum permissible concentration (MPC), ecological rate setting

REFERENCES

1. Volkov I. V., Zalicheva I. N., Shustova N. K., Il'mast T. B. The system of federal maximum admissible concentrations for the fishing industry: does it make ecological sense? // Russian Journal of Ecology. 1996. Vol. 27. № 5. P. 334–338.
2. Gorbachev S. A. Metodologiya i praktika otsenki ushcherba vodnym bioresursam ot khozyaystvennoy deyatel'nosti [Methodology and practice of assessing detriment to aquatic bioresources from anthropogenic activity]. Petrozavodsk, Petrozavodsk University Press, 2010. 383 p.
3. GOST 17.1.2.04-77. Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsii rybokhozyaystvennykh vodnykh ob''ektov [GOST 17.1.2.04–77. Environmental condition indicators and rules for estimating water bodies used for commercial fishery]. Moscow, State Standartization Committee of the Council of Ministers of the USSR Publ., 1977. 17 p.
4. Zalicheva I. N., Ganina V. S., Shustova N. K. Ecotoxicological aspects of the tolerance of hydrobionts to acidification of the aquatic environment in the Taiga natural climatic zone // Russian Journal of Ecology. 2006. Vol. 37. № 1. P. 60–65.
5. Ivanter E. V., Korosov A. V. *Vvedenie v kolichestvennuyu biologiyu* [Introduction to quantitative biology]. Petrozavodsk, Petrozavodsk University Press, 2003. 304 p.
6. Isakov Yu. A., Kazanskaya N. S., Tishkov A. A. *Zonal'nye zakonomernosti dinamiki ekosistem* [Zonal regularities of the ecosystems dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 150 p.
7. Kamshilov M. M. *Evolyutsiya biosfery* [Evolution of biosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 256 p.
8. Kitaev S. P. *Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtiologov* [Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk, Karelian RC of RAS, 2007. 395 p.
9. Luk'yanenko V. I. Ekologicheskie aspekty reglamentirovaniya antropogennogo zagryazneniya vodoemov Rossii [Ecological aspects of regulating anthropogenic pollution of Russian water bodies]. *Ekologicheskie aspekty reglamentirovaniya antropogennogo zagryazneniya vodoemov Rossii (regional'nye PDK).* Yaroslavl', Verkhnevolzhskiy department of the Russian Ecological Academy, 1998. P. 37–62.
10. Lur'e Yu. Yu. *Unificirovannye metody analiza vod* [Unified methods of analysing waters]. Moscow, Khimia Publ., 1973. 376 p.
11. *Metodicheskie ukazaniya po ustanovleniyu ekologo-rybokhozyaystvennykh normativov (PDK i OBUV) zagryaznyayushchikh veshchestv dlya vody i vodnykh ob''ektov, imeyushchikh rybokhozyaystvennoe znachenie* [Guidelines for establishing ecological and commercial fishing standards (MAC and ASLI) for pollutants of commercially valuable water and water objects]. Moscow, VNIRO Publ., 1998. 145 p.
12. Moiseenko T. I. *Vodnaya ekotoksikologiya: Teoreticheskie i prikladnye aspekty* [Aquatic ecotoxicology: Theoretical and applied aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2009. 400 p.
13. Nikanorov A. M., Zhulidov A. V. *Biomonitoring metallov v presnovodnykh ekosistemakh* [Biomonitoring of metals in freshwater ecosystems]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 312 p.
14. Scor-UNESCO, Working group 17, Determination of photosynthesis pigment in seawater. Paris, UNESCO Publ., 1960. 69 p.

Поступила в редакцию 05.03.2013

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Июнь, № 4 **Биология** **2013**

УДК [599.323.4:591.133.16]:591.542

ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА ИЛЬИНА
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
ilyina@bio.krc.karelia.ru

ИРИНА ВАЛЕРЬЕВНА БАИШНИКОВА
кандидат биологических наук, ведущий биолог, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
iravbai@mail.ru

ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА
доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой фармакологии, организации и фармации с курсами микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
irinav@petrsu.ru

ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВИТАМИНОВ А И Е В ОРГАНАХ КРЫС НА ФОНЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ЭКЗОГЕННОГО МЕЛАТОНИНА*

Исследовано влияние мелатонина на содержание витаминов А и Е в органах (печень, почки, сердце) 6-, 12-, 18-месячных крыс при различных световых режимах. В результате установлено, что в большой степени уровень витаминов в тканях зависит от условий освещения; наиболее значительные изменения концентрации витаминов А и Е обнаружены у крыс, содержавшихся при постоянном и естественном освещении. Уровень токоферола в печени 6-месячных крыс, содержавшихся при постоянном освещении, был значительно выше. Добавление мелатонина и освещение практически не влияли на концентрацию токоферола в сердце крыс, за исключением режима естественного освещения, при котором мелатонин повышал содержание витамина Е. Применение мелатонина приводит к сдвигу уровня витаминов А и Е у крыс в сторону нормализации, уменьшению как возрастных, так и вызванных неблагоприятными условиями внешней среды изменений системы антиоксидантной защиты и связанному с этим общему снижению дефицита антиоксидантов в организме.

Ключевые слова: антиоксиданты, витамины А и Е, мелатонин, крысы, возраст, световые режимы

Изучение физиолого-биохимических адаптаций организма определяется необходимостью исследования механизмов, обеспечивающих приспособление к факторам внешней среды. При индивидуальном развитии организма адаптивная функция осуществляется уже на стадии зиготы, что обеспечивает приспособление не только к текущим, но и к меняющимся условиям среды в процессе развития. Необходимо отметить, что и в старости организм не утрачивает способности к адаптационным реакциям, несмотря на прогрессирующее сужение их границ [3], [6].

Исследование процессов возрастных изменений в органах и тканях выявило снижение в них многих физиологически активных веществ, в том числе и витаминов, дефицит которых является одним из проявлений нарушения обмена веществ организма. Свободные радикалы, образующиеся в результате различных окислительных реакций в организме, вызывают повреждение макромолекул. С возрастом происходит снижение общей антиокислительной и антирадикальной активности тканей, повышение уровня продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ). В нормальных условиях процесс ПОЛ находится под контролем ферментативных и неферментативных систем клетки. В то же время обнаружение в органах и тканях продуктов взаимодействия активных форм кислорода с макромолекулами свидетельствует о том, что клетки постоянно подвергаются окислительному стрессу, противодействие которому может играть существенную роль в механизме геропротекторного действия эндогенных и экзогенных антиоксидантов. От наличия в ткани низкомолекулярных антиоксидантов, в первую очередь таких, как токоферол и ретинол, зависит ее антирадикальная защита [4], [6]. Установлено, что видовая продолжительность жизни прямо коррелирует с содержанием в сыворотке крови α-токоферола, β-каротина, а также некоторых других антиоксидантов [1]. В то же время, помимо витаминов Е и А, регуляция антиоксидантной защиты может осуществляться за счет других неферментативных антиоксидантов. Так, эпифизарный гормон мелатонин отличается нормализующим характером воздействия на различные физиологические показатели [2]. Наряду с этим мелатонин обладает сильным антиоксидантным эффектом и препятствует ускоренному старению организма, сопряженному с увеличением уровня продуктов ПОЛ: нормализует ряд возрастных нарушений жироуглеводного обмена, восстанавливает репродуктивную функцию у старых животных, обладает антиканцерогенным эффектом и потенциальными регенеративными свойствами. Известно, что при окислительном стрессе мелатонин эффективно конкурирует с другими антиоксидантами. В то же время концентрация мелатонина, как и ряда других биологически активных соединений, характеризуется выраженным снижением в процессе старения [8]. Существует зависимость между возрастным снижением продукции мелатонина, продолжительностью жизни и развитием возрастных заболеваний [1], [9]. В связи с этим одним из важнейших факторов, лежащих в основе геропротекторных свойств низкокалорийной диеты, рекомендованной для людей среднего и пожилого возраста, является замедление возрастного снижения продукции мелатонина [8], [10], [11].

Немаловажной причиной, влияющей на процесс старения различных физиологических систем, является свет. Изменение оптимального диапазона его воздействия приводит к резкому сокращению продолжительности жизни [1]. Значительно меняясь при разных световых условиях, уровень мелатонина оказывает влияние как на содержание других антиоксидантов, так и на состояние антиоксидантной системы организма в целом. Целью работы было исследование влияния экзогенного мелатонина на возрастные изменения содержания витаминов А и Е в органах крыс, содержавшихся в различных световых условиях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на самках и самцах крыс линии ЛИО, содержавшихся на стандартном рационе вивария со свободным доступом к воде. С месячного возраста животные были рандомизированно разделены на 3 группы по 30 животных в каждой. Первая группа находилась в условиях стандартного чередующегося светового режима (12 ч свет / 12 ч темнота), вторая группа – в условиях естественного освещения с учетом особенностей годового фотопериодизма Северо-Запада России, третья группа – при круглосуточном постоянном освещении люминесцентными лампами. В возрасте 4 месяцев крысы каждой группы были подразделены на две подгруппы: первая являлась контрольной по отношению к данному световому режиму, крысы второй подгруппы получали мелатонин (Sigma, США) в дозе 10 мг/л вместе с питьевой водой 5 дней в неделю в вечернее время. Концентрацию витаминов А и Е (α-токоферол) в органах крыс (печень, почки, сердце) определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [7] в 6, 12, 18-месячном возрасте. Хроматографическое разделение осуществляли на микроколоночном хроматографе с ультрафиолетовым детектором. Элюентом служила смесь

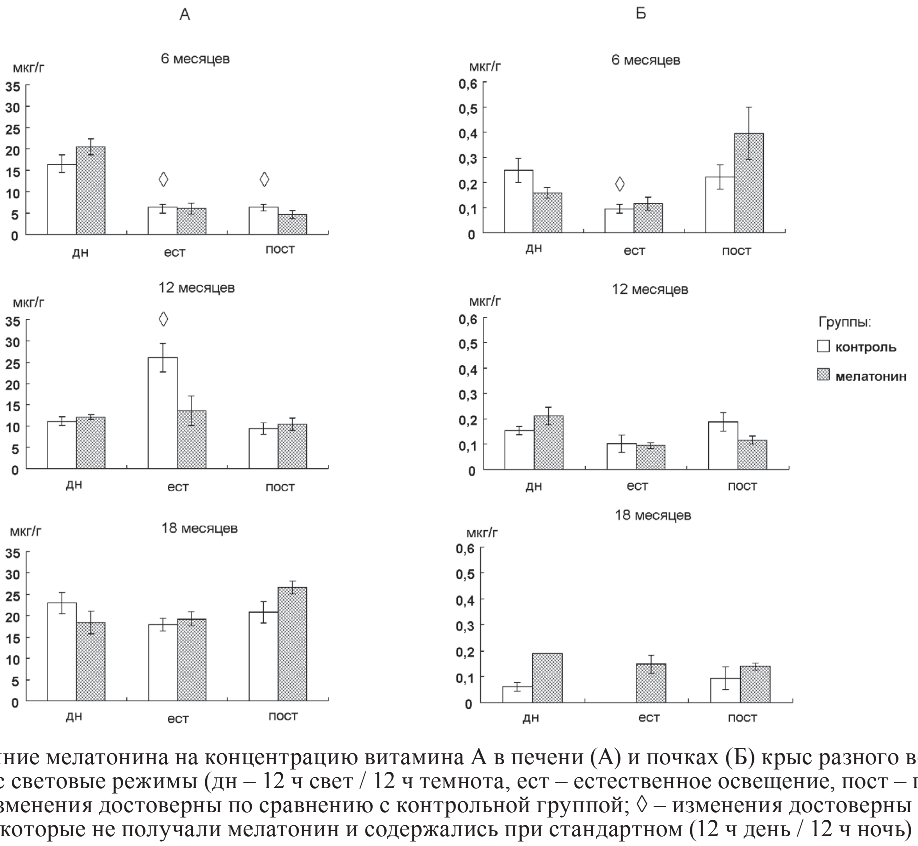


Рис. 1. Влияние мелатонина на концентрацию витамина А в печени (А) и почках (Б) крыс разного возраста. По оси абсцисс световые режимы (дн – 12 ч свет / 12 ч темнота, ест – естественное освещение, пост – постоянное освещение); * – изменения достоверны по сравнению с контрольной группой; ◊ – изменения достоверны по сравнению с животными, которые не получали мелатонин и содержались при стандартном (12 ч день / 12 ч ночь) освещении

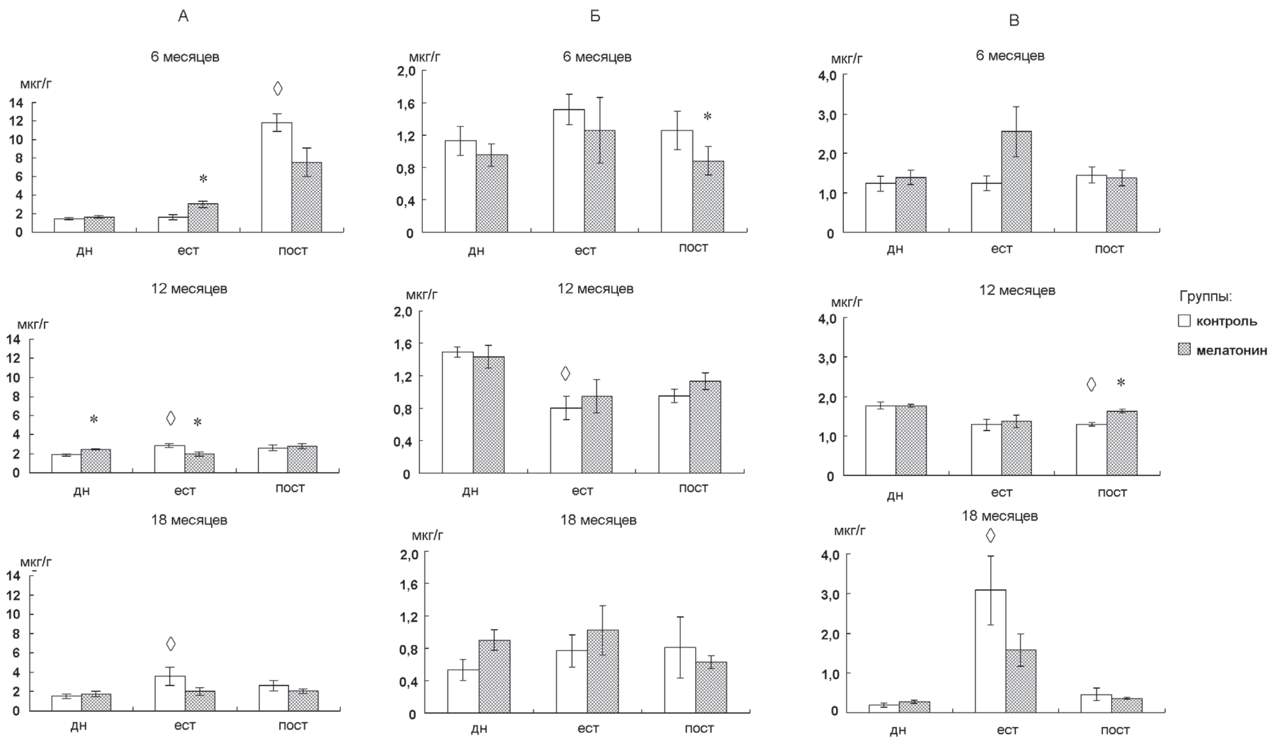


Рис. 2. Влияние мелатонина на концентрацию витамина Е в печени (А), почках (Б) и сердце (В) крыс разного возраста (условные обозначения как на рис. 1)

гексана с изопропанолом в соотношении 98,5:1,5. Для построения калибровочных кривых использовали стандартные растворы α-токоферола («Sigma», США). В сердце измеряли только содержание токоферола, так как ретинол в данном органе не детектируется. Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами вариационной статистики, сравнение различий между группами проводили с применением непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни. Исследования выполнены с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Института биологии КарНЦ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованием установлено, что мелатонин повышал концентрацию витамина А в печени 6-месячных крыс при стандартном освещении (рис. 1) и достоверно увеличивал содержание витамина Е в печени в условиях естественного освещения (рис. 2). При этом уровень α-токоферола в печени крыс, содержавшихся при постоянном освещении, был значительно выше по сравнению с другими группами. В то же время добавка мелатонина приводит к снижению концентрации витаминов А и Е в этой группе и уменьшает содержание витамина Е в почках животных всех опытных групп. Как известно, мелатонин обладает значительной антиоксидантной активностью, что, очевидно, является причиной снижения содержания витаминов при его дополнительном введении в рацион, когда биосинтез самого эндогенного антиоксиданта в организме понижен в условиях освещения, существенно отличающегося от стандартного. Добавка мелатонина и освещение практически не влияли на концентрацию α-токоферола в сердце крыс, за исключением режима естественного освещения, при котором мелатонин повышал содержание витамина Е. В этом случае отчетливо проявилось известное взаимное влияние токоферола и ретинола [4], [6], которое выразилось в перераспределении витаминов в органах под влиянием исследуемых факторов.

В печени 12-месячных крыс мелатонин увеличивал содержание витаминов А и Е при стандартном и постоянном освещении и приводил к снижению содержания обоих витаминов при естественном освещении. Необходимо учесть, что в этот период, приходящийся на весенние месяцы, при естественном режиме животные находились в условиях удлиняющегося светового дня (эффект «белых ночей») с приходящимся на конец июня максимумом, совпадавшим в эксперименте с 12-месячным возрастом крыс и следующим за этим увеличением темного времени суток (возраст 18 месяцев). В сердце эндогенный мелатонин вызывал достоверное увеличение содержания витамина Е при постоянном освещении.

В возрасте 18 месяцев у крыс в печени при естественном и постоянном освещении под влиянием мелатонина отмечено увеличение концентрации ретинола и снижение токоферола. В сердце, как и в печени, максимальное содержание витамина Е было при естественном освещении, а мелатонин приводил к его снижению. В условиях стандартного освещения мелатонин практически не влиял на концентрацию токоферола в сердце крыс во все исследованные периоды. Возрастное снижение содержания ретинола, характерное для почек [12], проявилось при всех режимах освещения, но наиболее значительно – при естественном, причем в 18 месяцев витамин А детектировался только у крыс, получавших добавку мелатонина. Очевидно, при возрастном изменении эффективности антиоксидантной системы и снижении в организме уровня мелатонина, усиливаемого внешними факторами, другие антиоксиданты интенсивнее расходуются на удовлетворение биологических потребностей организма.

Процесс старения в значительной степени связан со снижением эффективности систем утилизации активных форм кислорода в тканях, поэтому с возрастом в органах изменяется не только концентрация витаминов А и Е, что связано, очевидно, с существенным нарушением обмена веществ при старении, но и реакция на мелатонин, которая проявляется иначе, чем у молодых животных [5]. Можно предположить, что длительное употребление одинаковой дозы мелатонина вызывает состояние толерантности, при котором ответ на действие препарата в ряде случаев может быть ослаблен. В то же время применение мелатонина в нашем эксперименте привело к увеличению максимальной продолжительности жизни у самок крыс при естественной освещенности и средней продолжительности жизни у животных обоего пола в условиях постоянного освещения.

Действие добавки мелатонина на концентрацию витаминов А и Е, кроме режима постоянного освещения, заметно проявилось в условиях естественного освещения с существенными периодическими его изменениями в течение года, что, вероятно, оказывает даже большее стрессовое воздействие на организм животных, чем постоянное освещение, вызывающее значительное напряжение антиоксидантной системы. В условиях постоянного освещения наиболее существенные изменения концентрации α-токоферола в печени и почках под влиянием добавки мелатонина происходили у молодых и зрелых животных. Ранее было показано, что уровень эндогенного мелатонина зависит от фотопериода, а дополнительное введение гормона или стимулирующего его синтез вещества обусловливает выраженность таких изменений антиоксидантной системы [5]. Результаты нашего исследования выявили достаточно высокую степень устойчивости содержания токоферола в сердце к влиянию не только экзогенного мелатонина, но и света во всех возрастных группах как важного фактора сохранения динамического равновесия антиоксидантного статуса в миокарде, причем воздействие изученных факторов было минимально у молодых животных.

Таким образом, исследование показало, что длительное применение мелатонина оказывает модулирующее влияние на содержание витаминов А и Е в органах крыс разного возраста. В то же время концентрация витаминов в значительной степени зависит от антиоксидантных свойств эндогенного мелатонина, которые в исследуемых группах выражались различно. Действие экзогенного мелатонина на концентрацию обоих витаминов наиболее значительно проявилось в условиях освещенности, существенно отличающейся от стандартной. Причем складывается впечатление, что периодически (сезонно) меняющийся световой режим оказывает большее влияние на степень этих изменений, которые коснулись антиоксидантной системы, так как подавление функции образования мелатонина эпифизом отражается прежде всего на уровне антиоксидантов, преимущественно работающих в комплексе. Наши исследования показали, что отношения мелатонина, токоферола и ретинола в большинстве случаев носят взаимокомпенсаторный характер, когда повышение содержания одного антиоксиданта индуцирует снижение другого, благодаря чему сохраняется динамическое равновесие антиоксидантной системы, обеспечивающее повышение стабильности состава внутренней среды организма [4], [6].

Раннее снижение эффективности систем утилизации активных форм кислорода, важным компонентом которых являются неферментативные низкомолекулярные антиоксиданты, может вызывать значительное ограничение функциональных возможностей органов, характерное для более поздних стадий онтогенеза, ускорять начало дегенеративных изменений и явления преждевременного старения. Применение мелатонина приводит к сдвигу уровня витаминов А и Е у крыс в сторону нормализации, уменьшению как возрастных, так и связанных с неблагоприятными условиями внешней среды изменений системы антиоксидантной защиты и сопряженному с этим общему снижению дефицита антиоксидантов в организме.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 07-04-00546, ФЦП ГК № 02.740.11.0700, и Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А н и с и м о в В. Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения. СПб., 2003. 468 с.
2. А р у ш а н я н Э. Б., Б е й е р Э. В., М а с т я г и н а О. А., М а с т я г и н С. С., С и д о р е н к о Ж. И. Влияние мелатонина на некоторые гематологические показатели у здоровых людей // Экспериментальная и клиническая фармакология. 2006. Т. 69. № 5. С. 36–38.
3. А р ш а в с к и й И. А. Физиологические механизмы и закономерности индивидуального развития. М.: Наука, 1982. 270 с.

4. Д а д а л и В. А., Т у т е л ь я н В. А., Д а д а л и Ю. В. и др. Каротиноиды. Биодоступность, биотрансформация, антиоксидантные свойства // Вопросы питания. 2010. Т. 79. № 2. С. 4–17.
5. И л ь и н а Т. Н., В и н о г р а д о в а И. А., И л ю х а В. А. и др. Влияние геропротекторов на возрастные изменения антиоксидантной системы печени крыс при различных световых режимах // Успехи геронтологии. 2008. Т. 21. № 3. С. 386–393.
6. М е н ь щ и к о в а Е. Б., Л а н к и н В. З., З е н к о в Н. К. и др. Окислительный стресс. Прооксиданты и антиоксиданты. М., 2006. 556 с.
7. С к у р и х и н В. Н., Д в и н с к а я Л. М. Определение α-токоферола и ретинола в плазме крови сельскохозяйственных животных методом микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии // Сельскохозяйственная биология. 1989. № 4. С. 127–129.
8. Х а в и н с о н В. Х. Развитие идей И. И. Мечникова в работах по пептидной регуляции старения. СПб., 2008. 592 с.
9. A b u j a P. M., L i e b m a n P., H a y n M. et al. Antioxidant role of melatonin in lipid peroxidation of human LDL // FEBS Lett. 1997. Vol. 413. № 2. P. 289–293.
10. B a l k a n J., S e n e r G., C e l i k b a ş U. et al. Melatonin improved the disturbances in hepatic prooxidant and antioxidant balance and hepatotoxicity induced by a high cholesterol diet in C576BL/6J mice // Int. J. Vitam. Nut. Res. 2004. Vol. 74. № 5. P. 349–354.
11. F r o l k i s V. V., K u l c h i t s k y O. K., N o v i k o v a S. N. et al. Blood lipoproteins and their effect on contractile function of vessels in rats of different age // Mech. Ageing Dev. 1997. Vol. 97. № 3. P. 207–214.
12. Q u i r o z Y., F e r r e b u z A., R o m e r o F. et al. Melatonin ameliorates oxidative stress, inflammation, proteinuria, and progression of renal damage in rats with renal mass reduction // Am. J. Phisiol. Renal. Phisiol. 2008. Vol. 294. P. 336–344.

Il'ina T. N., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Baishnikova I. V., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vinogradova I. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

AGE-RELATED CHANGES OF VITAMINS A AND E CONTENT IN RATS' ORGANS UNDER MODIFIED LIGHT CONDITION AND EXOGENIC MELATONIN

The influence of melatonin on vitamins A and E content in organs (liver, kidney, heart) of 6, 12, and 18-months old rats under different light conditions was studied. The present research has demonstrated that vitamins' level in rats' tissues depends on light conditions. As a result, the most significant changes in the antioxidant system were revealed under constant and natural light exposure. The level of vitamin E in the liver of the 6-months old rats was significantly higher than in the other groups due to constant light condition. Addition of melatonin and constant light condition had no influence on vitamin E concentration in the heart of the rats. The exception took place in natural light condition under which introduction of melatonin increased vitamin E content. Melatonin supplementation had a positive influence on vitamins A and E level in rats' tissues, decreased changes in the antioxidant system, and reduced antioxidant deficit in the organisms.

Key words: antioxidants, vitamins A and E, melatonin, rats, age, light condition

REFERENCES

1. A n i s i m o v V. N. Molekulyarnye i fisiologicheskie mekhanismy stareniya [Molecular and physiological mechanisms of aging]. St. Petersburg, 2003. 468 p.
2. A r u s h a n y a n E. B., B e y e r E. V., M a s t y a g i n a O. A., M a s t y a g i n S. S., S i d o r e n k o G. I. Melatonin effect on the hematological indices of healthy humans [Vliyanie melatonina na nekotorye gematologicheskie pokazateli u zdorovykh ludey]. *Eksperimental'naya i klinicheskaya farmakologiya [Experim. and clinical pharmacology]*. 2006. Vol. 69. № 5. P. 36–38.
3. A r s h a v s k i y I. A. Fisiologicheskie mekhanismy i zakonomernosti individual'nogo razvitiya [Physiological mechanisms and regularity of individual development]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 270 p.
4. D a d a l i V. A., T u t e l ' y a n V. A., D a d a l i Yu. V., K r a v c h e n k o L. V. Carotenoids. Bioavailability, biotransformation, antioxidant properties [Karotinoidy. Biodostupnost'», biotransformatsiya, antioksidantnye svoystva]. *Voprosy pitaniya* [Problems of nutrition]. 2010. Vol. 79. № 2. P. 4–17.
5. I l ' i n a T. N., V i n o g r a d o v a I. A., I l y u k h a V. A., K h i z k i n E. A., A n i s i m o v V. N., K h a v i n s o n V. Kh. The influences of geroprotectors on age-related changes of antioxidant system in rats' liver under different light condition. [Vliyanie geroprotectorov na vosrastnye izmeneniya antioksidantnoy sistemy pecheni krys pri razlichnykh svetovykh rezhimakh]. *Uspekhi gerontologii* [Advances in Gerontology]. 2008. Vol. 21. № 3. P. 386–393.
6. M e n ' s h c h i k o v a E. B., L a n k i n V. Z., Z e n k o v N. K., B o n d a r I. A., K r u g o v y k h N. F., T r u f a k i n V. A. *Okislitel'nyy stress. Prooksidanty i antioksidanty* [Oxidative stress. Prooxidants and antioxidants]. Moscow, 2006. 556 p.
7. S k u r i k h i n V. N., D v i n s k a y a L. M. Determination of α-tocopherol and retinol in the blood plasma of farm animals by high performance liquid chromatography method [Opredelenie α-tokopherola i retinola v plasme krovi sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh metodom vysokoeffektivnoy zhidkostnoy khromatografii]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* [Agricultural biology]. 1989. № 4. P. 127–129.
8. K h a v i n s o n V. Kh. Rasvitie idey I. I. Mechnikova v rabotakh po peptidnoy regulyatsii stareniya [Development of I. I. Mechnikov idees in the works on the peptides regulation of aging]. St. Petersburg, 2008. 592 p.
9. A b u j a P. M., L i e b m a n P., H a y n M. et al. Antioxidant role of melatonin in lipid peroxidation of human LDL // FEBS Lett. 1997. Vol. 413. № 2. P. 289–293.
10. B a l k a n J., S e n e r G., C e l i k b a ş U. et al. Melatonin improved the disturbances in hepatic prooxidant and antioxidant balance and hepatotoxicity induced by a high cholesterol diet in C576BL/6J mice // Int. J. Vitam. Nutr. Res. 2004. Vol. 74. № 5. P. 349–354.
11. F r o l k i s V. V., K u l c h i t s k y O. K., N o v i k o v a S. N. et al. Blood lipoproteins and their effect on contractile function of vessels in rats of different age // Mech. Ageing Dev. 1997. Vol. 97. № 3. P. 207–214.
12. Q u i r o z Y., F e r r e b u z A., R o m e r o F. et al. Melatonin ameliorates oxidative stress, inflammation, proteinuria, and progression of renal damage in rats with renal mass reduction // Am. J. Phisiol. Renal. Phisiol. 2008. Vol. 294. P. 336–344.

Поступила в редакцию 28.03.2013

Июнь, № 4 **Биология** **2013**

УДК 598.28/.29(470.11)

ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА ХОХЛОВА
доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
hokhlova@karelia.ru

МАРИНА ВЛАДИМИРОВНА ЯКОВЛЕВА
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заповедник «Кивач» (пос. Кивач, Республика Карелия, Российская Федерация)
kivach@onego.ru

АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ АРТЕМЬЕВ
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
artem@karelia.ru

ПТИЦЫ КЕНОЗЕРСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА (воробьиные – passerine)

Обобщены данные, собранные в 1995–2003 годах в Архангельской области на территории Кенозерского национального парка (61°55’ с. ш., 38°07’ в. д.) в зоне контакта европейской и сибирской авифаун и концентрации границ ареалов северных и южных видов. Приведены сведения о характере пребывания, уровнях численности, сроках сезонных явлений в жизни 91 вида воробьиных птиц. Авифауна высоко гетерогенна. Отловами птиц, находками гнезд и выводков подтверждено гнездование 60 видов, в том числе регионально редких и находящихся на периферии ареалов (большой сорокопут *Lanius excubitor*, свиристель *Bombycilla garrulus*, варакушка *Cyanosylvia svecica*, черноголовый чекан *Saxicola torquata*, черный дрозд *Turdus merula*, трещотка *Phylloscopus sibilatrix*, зеленая пеночка *Ph. trochiloides*, малая мухоловка *Siphia parva*, лазоревка *Parus caeruleus*, овсянка-крошка *Emberisa pusilla*, юрок *Fringilla montifringilla*, щегол *Carduelis carduelis*, чечетка *Acanthis flammea* и др.). Отмечены летние встречи синехвостки *Tarsiger cyanurus*, сверчков (речного *Locustella fluviatilis*, обыкновенного *L. naevia* и пятнистого *L. lanceolata*), дроздовидной камышевки *Acrocephalus arundinaceus*, бормотушки *Hippolais caligata*, черноголовой славки *Sylvia atricapilla*, таловки *Ph. borealis*, московки *P. ater*, садовой овсянки *E. hortulana*, коноплянки *Cannabina cannabina*, белокрылого клеста *Loxia leucoptera*, иволги *Oriolus oriolus* и др.

Ключевые слова: орнитофауна, гнездовой ареал, граница распространения, редкие птицы, Кенозерский национальный парк, Архангельская область

Кенозерский государственный национальный парк (КГНП) находится на юго-западе Архангельской области (61°55’ с. ш., 38°07’ в. д.) у ее границы с Республикой Карелия (см. рисунок). Входит в состав ключевой орнитологической территории международного значения «Кенозерье» [19]. Охватывает обширную площадь (138 700 га) с высоким природным разнообразием [18]. В его пределах присутствуют возможности для жизни почти всех птиц, встречающихся на северо-западе России на данных широтах [16]. Авифауна парка высоко гетерогенна [17]. Его территория попадает в зону концентрации границ ареалов южных и северных птиц [5]. При этом северная часть резервата находится на восточной окраине Балтийского щита, а южная, с иными природными условиями, – на периферии Русской платформы. На стыке этих крупнейших геологических структур европейские виды встречаются с представителями сибирской фауны.

Картосхема Кенозерского государственного национального парка

К настоящему времени в границах КГНП зарегистрирован 201 вид птиц [17]; почти половина их – воробьиные птицы (passerine), принадлежащие к самому крупному отряду авифауны региона – отряду воробьиных (Passeriformes). Население воробьиных птиц парка отличается большой динамичностью, поскольку для многих его представителей, обитающих здесь на пределе распространения, характерно спорадичное расселение и резкие колебания численности по годам. Особенности местной авифауны делают эти территории чрезвычайно интересными не только в зоогеографическом, но и в эколого-популяционном плане. Но пока данных о местной авифауне очень немного. Поэтому в видовые очерки включены все материалы, которые могут дать какое-то представление не только о видовом составе, характере пребывания и уровне численности воробьиных птиц КГНП, но и о сроках их миграций, гнездования, линьки и пр.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Главной целью орнитологических исследований в КГНП в 1995–2003 годах было описание видового состава птиц и особенностей их пребывания в пределах парка. Основное внимание уделяли регионально редким птицам и видам, находящимся на пределах ареалов, поиску их гнездовых участков, гнезд и выводков. Птиц всех видов учитывали на полную дальность обнаружения на двух постоянных маршрутах: д. Видягино – Порженские озера (тропа № 1, 6 км) и д. Морщихинская – оз. Наглимозеро (3 км). Плотности населения ряда обычных видов рассчитывали по числу особей, зарегистрированных в 50-метровой полосе. Отловы паутинными сетями (14 шт.) проводили: у пос. Вершинина, деревень Морщихинская, Кривцово 28.08–06.09.1996 (120 ч) и 11–15.08.1999 (96 ч). У пойманных птиц (N = 379, 34 вида) определяли вид, пол, возраст, по известной методике [6], [10] описывали состояние оперения. Подробная информация об истории, сроках, методах и участниках работ представлена в публикации [17], посвященной неворобьиным птицам (non passerine) КГНП.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полный список птиц, которые могут быть встречены в пределах КГНП [18], составленный с учетом ситуации на соседних территориях Карелии [14], включает 263 вида, в том числе 107 представителей отряда воробьиных (Passeriformes). Из них к настоящему времени в границах парка зарегистрирован 91 вид[1], включая ряд редких и залетных птиц (пятнистый сверчок, синехвостка, бормотушка, дроздовидная камышевка, кедровка) и северных мигрантов (краснозобый конек, лапландский подорожник). Гнездование 60 видов подтверждено находками гнезд и выводков. В их числе редкие птицы, обитающие здесь на периферии гнездовых ареалов (черноголовый чекан, черный дрозд, трещотка, зеленая пеночка, малая мухоловка, лазоревка, овсянка-крошка, юрок и др.).

1. **Полевой жаворонок – *Alauda arvensis* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Фоновая птица крупных лугов и сельхозугодий парка. Прилетает в апреле, отлетает к середине октября. Осенью выраженный пролет отмечен у д. Морщихинской 23.09.2001 и 27.09.2000.

2. **Рогатый жаворонок – *Eremophila alpestris* (L.).** Северный вид, изредка останавливающийся на сельхозугодьях парка во время пролета. Стайки из 40–45 птиц встречены у д. Морщихинской 30.04 и 02.05.2002.

3. **Береговая ласточка – *Riparia riparia* (L.).** Обычный в регионе вид. Гнездится в норах в береговых откосах, песчаных карьерах и других местах. Жилые колонии известны в южной части парка у д. Орлово (до 50 нор), на въезде в д. Морщихинскую (до 30 пар) и на берегу Лекшмозера (более 10 пар). Судя по встречам 11.07.1997, обитает вблизи д. Усть-Поча. В прошлом гнездилась также в береговом обрыве у д. Зихново. В августе птицы собираются в стаи (08.08.1999 – более 40 птиц у д. Морщихинской), появляются вне гнездовых биотопов (13.08.1999 на оз. Большом Порженском – 6 птиц). Исчезают ко второй декаде августа.

4. **Деревенская ласточка – *Hirundo rustica* L.** Обычный гнездящийся и пролетный синантропный вид. Самая многочисленная ласточка парка. Так, 12.07.1997 в деревне на Кумбасозере зарегистрировано до сотни птиц. Обитает в жилых и брошенных деревнях, используя для гнездования преимущественно деревянные постройки. Улетает в начале сентября. Выраженный пролет наблюдали 02.09.2003: несмотря на дождь, множество птиц пролетали на большой высоте над д. Морщихинской. Поздняя встреча (2 особи) – 08.09.2000 (сообщение Й. Хогмандера).

5. **Городская ласточка – *Delichon urbica* (L.).** По численности заметно уступает деревенской ласточке. Гнездится на каменных или бетонных сооружениях в пос. Вершинина и д. Морщихинской. Обнаружена в полуразрушенной каменной церкви в нежилой деревне на Макарьих озерах (06.07.1997 – более 10 птиц). Отдельные гнезда найдены на деревянных постройках в деревнях Зихново, Кривцово, Першлахта. Отлетает к началу сентября (03.09.1996 несколько птиц в д. Кривцово).

6. **Желтая трясогузка – *Motacilla flava* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Обитатель открытого ландшафта – прибрежных и сенокосных лугов, открытых болот. В конце июля – начале августа, когда отдельные пары еще кормят выводки, по полям и дорогам уже идет массовая миграция. Большие скопления птиц зарегистрированы 13.08.1999 на лугах у оз. Малого Порженского, где обычно гнездится 1–2 пары. Массовая миграция заканчивается в III декаде августа, отдельные особи встречаются до середины сентября.

7. **Белая трясогузка – *M. alba* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. В парке держится в основном в населенных пунктах и их окрестностях, используя для гнездования укрытия, связанные с деятельностью челове-

ка (постройки, мосты, брошенную технику, кучи бревен и др.). Реже поселяется в естественных укрытиях (ниши, дупла) по берегам рек и лесным опушкам. Массовый мигрант, образующий сотенные скопления по дорогам и на лугах в конце июля – середине августа.

8. **Лесной конек – *Anthus trivialis* (L.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Предпочитает светлые разреженные высокоствольные леса с различным составом древостоя. Нередко устраивает гнезда вблизи опушек на полянах и лугах: гнезда с 5 яйцами найдены на лугах у д. Масельга 28.06.1996 и д. Думино 01.07.1996. Один из массовых мигрантов в августе – начале сентября. Две молодые птицы, заканчивающие линьку, отловлены у пос. Вершинина 01.09.1996.

9. **Луговой конек – *A. pratensis* (L.).** Обычный для региона гнездящийся и пролетный вид. В парке редок. Поселяется на открытых болотах и сырых лугах. Поющие самцы отмечены 02.06.1997 у д. Морщихинской (2), 04.06.1997 на болотах Щучьи Глади (1). Выводок встречен 12.07.1997 у Гамозера. У д. Морщихинской 29.08.1996 отловлен сеголеток в начале линьки; 08–09.09.2000 отмечали отдельных пролетных особей, в конце сентября – массовую миграцию.

10. **Краснозобый конек – *A. cervina* (Pall.).** Редкий пролетный вид. Птиц регистрировали 08.09.2000 и 06.09.2001 на аэродроме д. Морщихинской. Отмечены Й. Хогмандером 09.09.2000 у д. Масельга (5 особей).

11. **Жулан – *Lanius collurio* L.** Малочисленный гнездящийся и пролетный вид. Держится в основном в кустарниках по окраинам сельхозугодий. В окрестностях большинства деревень регистрировали по 1–2 пары. Более многочислен только у д. Кривцово (24.07.1995), а также за пределами парка у Кумбасозера, где 12.07.1997 на 2 км маршрута учтены 4 выводка и еще 2 тревожащиеся самки. У д. Горбачиха 12.08.1999 наряду с одиночными птицами встречен поздний выводок (не менее 3 птенцов с короткими хвостами). У пос. Вершинина 14.08.1999 отловлен сеголеток без признаков линьки. Поздняя встреча (2 молодые птицы) – 28.08.2002 у д. Морщихинской.

12. **Большой сорокопут – *L. excubitor* L.** Представитель Красной книги России. В парке редок. Гнездился в 1995 году у д. Федоровская: 18–19.07 здесь изредка пел и слабо тревожился самец, 20.07 с ним появился крупный хорошо летающий птенец. Пролетных одиночных птиц отмечали: 21.09.2001 у д. Гужево, 23.09.2001 у Лекшмозера, 29.09.2000 у д. Першлахта и 01.10.2000 на лугах у пос. Вершинина.

13. **Свиристель – *Bombycilla garrulus* (L.).** Редкий гнездящийся вид, обычный на пролете и зимовке. Находится на южной периферии гнездового ареала. Весной еще не распавшиеся стаи наблюдали у д. Морщихинской 01.05.2001. В гнездовой период – 2–3 встречи за сезон. Пары отмечены 04.07.1996 у оз. Монастырского, 09.08.1999 у д. Морщихинской, 20–21.07.1995 у оз. Малого Порженского (птицы собирали корм на лиственнице и черемухе у погоста и носили его в лес). Взрослую птицу, кормившую двух крупных летных птенцов, наблюдали 28.08.2002 в д. Морщихинской. Сроки осеннего пролета непостоянны. В начале сентября он, как правило, еще не идет: отдельных особей встречали 03.09.1996 (2) и 08.09.2000 (1). Но в 2001 году в этот период (05–07.09) уже шла интенсивная миграция, не завершившаяся даже к 09.10. В 2000 году, в конце сентября, также повсеместно встречались стаи до 150 птиц, которые к 29.09 объели всю рябину в окрестностях Лекшмозера.

14. **Оляпка – *Cinclus cinclus* (L.).** Редкий в регионе вид. Ежегодно появляется в парке в осенне-зимний период. Зимой и ранней весной отдельных особей регулярно видят на камнях у мельницы на незамерзающем участке р. Порженки (сообщение В. Нефедова и А. Костылева).

15. **Крапивник – *Troglodytes troglodites* (L.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид с низкой численностью. Населяет леса разных типов. Выводок встречен у оз. Сергозера 30.06.1996. Отловлены: сеголеток в гнездовом пере 12.08.1999, взрослая птица (8-я стадия) 28.09.1996, две молодые (в начале и конце линьки) 03.09.1996. Улетает поздно: 28–29.09.2000 у д. Морщихинской еще встречены 3 птицы.

16. **Лесная завирушка – *Prunella modularis* (L.).** Обычный в регионе гнездящийся и пролетный вид. В парке редок. Весной 2002 года пение слышали 30.04 у д. Гужево, 01.05 – у д. Морщихинской. В летнее время встречен только 11.06.1997 на тропе № 1 (2 особи). Гнезда найдены: 28.06.1996 – на склоне Хижгоры у д. Масельга (старое), 18.07.1995 – у оз. Большого Порженского (разоренное). В 1996 году отловлены молодые птицы, завершившие или завершающие линьку: 27–29.08 в д. Морщихинской (6), 02.09 в пос. Вершинина (3), 03.09 в д. Кривцово (3). Поздние встречи – 08.09.2000 и 22.09.2001 у оз. Монастырского.

17. **Зарянка – *Erithacus rubecula* (L.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. 11.06.1997 на тропе № 1 отмечено 2,7 поющих самца / км. В первой половине августа 1999 года в отловы не попала, тогда как 27.08–03.09.1996 там же поймана одна взрослая птица (9-я стадия) и 26 молодых с разным состоянием оперения (1–5-я стадия).

18. **Соловей – *Luscinia luscinia* (L.).** Редкий вид, находящийся на северной периферии гнездового ареала. Пение отмечено 02–11.06.1997 в окрестностях пос. Вершинина (6), деревень Морщихинская (2), Думино (2), Зихново (2). Першлахта (1), Видягино (1). Весной 1996 года соловьи появлялись даже в д. Труфаново (2), где их не слышали несколько лет. Ранее их отмечали также у д. Усть-Поча и на Наглимозере (сообщение А. Аникиева и В. Нефедова). Однако летних встреч, указывающих на возможность гнездования, пока не зарегистрировано.

19. **Варакушка – *Cyanosylvia svecica svecica* (L.).** Малочисленный гнездящийся и пролетный вид, северная рыжезвездная форма. Активно пели у д. Морщихинской 01 и 03.05.2002, 02 и 06.06.1997. В 1997 году в пос. Вершинина отмечены: 10.06 – самка, 10.07 – молодая птица в гнездовом наряде, 13.07 – интенсивная тревога пары, 14.07 – взрослый самец. В 1996 году отловлены: 28–29.08 – два сеголетка (5-я стадия) и два взрослых самца в новом оперении у д. Морщихинской, 01.09 – молодая птица (4-я стадия) у пос. Вершинина, 03.09 – перелинявший самец в д. Кривцово.

20. **Синехвостка – *Tarsiger cyanurus* (Pall.).** Редкий вид сибирского происхождения на западной периферии гнездового ареала [2], [11]. Поющий самец, перемещавшийся по вершинам елей, отмечен вечером 08.07.1996 в Лекшмозерской части парка у границы с Карелией.

21. **Горихвостка-лысушка – *Phoenicurus phoenicurus* (L.).** Малочисленный гнездящийся и пролетный вид.

Поющие самцы встречены 02.05.2001 у д. Морщихинской (1), 04.06.1997 у д. Труфаново (3 птицы на 20 км), 04–05.06.1997 у оз. Щучьего (2), 30.06.1996 у оз. Сергозера (2 на 14 км). Беспокоящиеся пары и особи в 1997 году отмечены: 11 и 12.07 за д. Усть-Поча, 10 и 11.07 в окрестностях деревень Першлахта и Зихново; самка с выводком 09.07 на маршруте № 1. Выводок, только что покинувший гнездо в полудупле старой березы, найден 11.07.1997 в д. Усть-Поча. Уже самостоятельный сеголеток встречен 21.07.1995 у оз. Большого Порженского. Самец (9-я стадия) отловлен 12.08.1999, молодая птица в середине линьки – 12.08.1999, еще четыре, завершающие смену наряда, – 29.08–03.09.1996. Поздняя встреча – 23.09.2001 у оз. Лекшмозера.

22. **Луговой чекан – *Saxicola rubetra* (L.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Встречается в парке на сенокосных лугах в окрестностях всех жилых и брошенных деревень. По 2–3 пары встречены даже на небольших зарастающих лугах у деревень Федоровская, Думино, Ожегово, Минино. Выводки разного возраста регистрировали с начала июля до середины августа (01.07.1996–13.08.1999). К концу августа большинство птиц покидают территорию парка. Поздняя встреча одиночной птицы – 30.08.1996 у оз. Малого Порженского.

23. **Черноголовый чекан – *S. torquata* (L.), *сибирский подвид S. t. maura*.** Редкая для региона птица, находящаяся на западной периферии гнездового ареала [13]. Одна встреча – 13.07.1997 в высокотравье у скотного двора в пос. Вершинина обнаружена пара с выводком из 4 слетков в возрасте 14–15 дней.

24. **Каменка – *Oenanthe oenanthe* (L.).** Обычный в регионе гнездящийся и пролетный вид. Селится на участках с низким и редким травостоем на сельхозугодьях, вырубках, у жилья человека. В парке малочисленна из-за недостатка подходящих местообитаний. Отдельные пары встречаются в основном в деревнях и их окрестностях. Весной 30.04.2002 в д. Морщихинской уже держался один самец. Там же 06.07.1996 встречен выводок, еще два – 10.08.1999 в пос. Вершинина.

25. **Черный дрозд – *Turdus merula* L.** Малочисленный вид, недавно освоивший регион [12]. Находится на северо-восточной периферии ареала. Численность колеблется по годам. Весной 01.05.2002 самцы уже пели у д. Морщихинской (2) и оз. Лебяжьего (1). В 1995 году встречены: 17.07 – поющий самец у д. Видягино, 19.07 – сеголеток на тропе № 1. В 1996 году был вполне обычным: гнездо (5 яиц) найдено 01.07 у д. Думино; пение отмечено 02.07 между деревнями Думино и Масельга (3), 26.06–04.07 у деревень Масельга, Думино, Ожегово, Труфаново, у Сергозера, Наглимозера, Левозера (по 1). В 1997 году по 2 самца пели: 10.06 у д. Першлахта, 11.06 на тропе № 1; по одному – 02–12.06 у деревень Морщихинская, Думино, Першлахта, Зихново, Масельга, 04–12.07 у д. Думино, на Кумбасозере, по дороге на оз. Макарьи. Осенью одиночки встречены у д. Морщихинской и оз. Монастырского 21–22.09.2001, у д. Думино 01.10.2000.

26. **Рябинник – *T. pilaris* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. При урожае рябины в небольшом числе зимует. В парке гнездится парами и небольшими колониями, в основном в населенных пунктах и их окрестностях (вокруг полей, деревень, по побережьям водоемов и др.). Две взрослые птицы отловлены 28 и 01.09.1996 (11-я и 10-я стадии). Входит в число массовых мигрантов: в конце сентября – начале октября 2000 года повсеместно встречались стаи по 30–50 особей.

27. **Белобровик – *T. iliacus* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Населяет лиственные и смешанные леса парка с богатым подростом и подлеском и кустарниковые заросли, окружающие населенные пункты. Избегает сплошных хвойных массивов. Прилетает в апреле: 30.04.2002 отмечен в числе массовых мигрантов у д. Гужево. За сезон выкармливает 2 выводка, которые встречаются с конца мая до середины августа. Гнездо (5 яиц) найдено у д. Думино 01.07.1996. Отловлены: взрослые – 15.08.1999 (9-я стадия) и 27.08.1996 (11-я стадия); молодые – 7 особей 11–15.08.1999 (0–4-я стадии) и одна – 03.09.1996 (2-я стадия). Массовый осенний пролет в 2000 году отмечен в конце сентября – начале октября.

28. **Певчий дрозд – *T. philomelos* G. L. Brehm.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Населяет леса разных типов, предпочитает смешанные древостои с развитым подростом ели. Один из фоновых видов в старых ельниках у болота Соколиные Глади (2–3 поющие птицы с одной точки 04.06.1997). В других местах численность значительно ниже: 11.06.1997 на тропе № 1 пело лишь 4 самца. Выводок, только покинувший гнездо, встречен 06.07.1997 по дороге на оз. Макарьи. Отловлены: 15.08.1999 одна взрослая (9-я стадия), 28.08–03.09.1996 3 взрослых (9, 10, 11-я стадии) и 4 молодых птицы (2–5-я стадия).

29. **Деряба – *T. viscivorus* L.** Обычный, но малочисленный вид. В гнездовое время встречен в парке только у оз. Монастырского: 05.06.1997 – поющий самец, 04.07.1996 – интенсивная тревога, возможно, при выводке. Осенью по 1–5 пролетных птиц отмечали у д. Морщихинской 02.09.2003, 21 и 23.09.2001. В 2000 году регистрировали в стаях рябинников 28.09 – в д. Гужево, 30.09 – у оз. Гниловальского.

30. **Речной сверчок – *Locustella fluviatilis* (Wolf).** Довольно обычная, но очень малочисленная птица. Поющих самцов слышали: в 1996 году у д. Морщихинской 01.07 (1) и 03.07 (1), у оз. Монастырского 05.07 (2); в 1997 году в ивняках у пос. Вершинина 09.06 (2) и 10.07 (1), в д. Зихново 11.06 (1), у Макарьих озер 07.07 (1). Тревога пары, возможно, у позднего выводка отмечена у д. Морщихинской 27.08.1996.

31. **Сверчок – *L. naevia* (Bodd.).** Редкий вид, обитающий на северном пределе гнездового ареала. Поющие самцы встречены: у оз. Шалмозера 26.07.1995, у оз. Монастырского 01.07.1996, в д. Першлахта 10.06.1997, за пределами парка у оз. Кумбасозера 12.07.1997.

32. **Пятнистый сверчок – *L. lanceolata* (Temm.).** Сибирский вид, залетающий в Архангельскую область и Карелию [1], [9], [14]. Поющий самец встречен у д. Труфаново в разреженном сероольшанике с малинником 05.07.1996.

33. **Барсучок – *Acrocephalus schoenobaenus* (L.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Населяет кустарники и тростниковые заросли по побережьям Лекшмозера, Кенозера, р. Кена и др. Выводок (15–16 дней) отмечен 16.07.1995 у пос. Вершинина. Пойманы: 11–15.08.1999 – 2 взрослые птицы без линьки у пос. Вершинина, 27–28.08.1996 4 молодые птицы, завершающие смену пера, у д. Морщихинской. Поздняя встреча – 08.09.2000 у оз. Монастырского (сообщение Й. Хогмандера).

34. **Садовая камышевка – *A. dumetorum* (Blyth.).** Обычный в регионе вид, находящийся на северной периферии ареала. Один из фоновых видов парка. Так, 04.07.1996 у д. Морщихинской в 2 часа ночи на 3 км дороги по окраинам полей пело не менее 11 самцов. У д. Зихново 11.06.1997 с одной точки было слышно 3–5 птиц, а 12.07 на 2 км по зарастающим лугам отмечен один выводок и 4 тревоги в разных местах. Отловлены: 13.08.1999 3 сеголетка, сменивших оперение, 27–28.08.1996 – 4, завершающих и завершивших линьку.

35. **Болотная камышевка – *A. palustris* (Bechst.).** Вид, находящийся у северной границы гнездового ареала. В парке обычна, но численность резко колеблется по годам. В 1996 году вошла в число фоновых видов только у д. Труфаново (04.07). Поющие самцы отмечены также 03.07 и 07.07 вблизи д. Морщихинской. Там же 27–28.08 пойманы две молодые птицы (перелинявшая и заканчивающая линьку). В 1997 году с поздней весной в начале июня болотная камышевка обнаружена во многих пунктах и даже оказалась среди фоновых видов у деревень Морщихинская, Труфаново, Першлахта. Однако, судя по отсутствию встреч в конце июня – начале июля, среди этих птиц преобладали пролетные особи.

36. **Дроздовидная камышевка – *A. arundinaceus* (L.).** Редкий вид, возможно, гнездящийся здесь на северном пределе ареала. Одна птица встречена 08.07.1997 в тростниках у д. Морщихинской, а также (сообщение С. Рыковой) в 2002 году на оз. Черном.

37. **Пересмешка – *Hippolais icterina* (Vieill.).** Малочисленный вид, находится вблизи северной границы ареала. Найдена только в южной части парка. Пение отмечено у д. Ожегово 02.07.1996 (3), в 1997 году по дороге к д. Масельге 03.06 (2), у оз. Монастырского 05.06, у д. Видягино 11.06. Вошла в число фоновых у д. Труфаново 04.06.1997, однако, судя по отсутствию летних встреч, это были в основном пролетные особи.

38. **Бормотушка – *H. caligata* (Licht.).** Редкий, возможно, гнездящийся вид, расширяющий границы ареала в северо-восточном направлении в последние десятилетия [3], [15]. Один самец в течение дня кормился и слабо пел в высокотравье у д. Видягино 23.07.1995.

39. **Садовая славка – *Sylvia borin* (Bodd.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Самая многочисленная славка парка. Гнездится в кустарниках, подлеске лиственных лесов, населенных пунктах. В 2 гнездах, найденных 28.06.1996 у д. Масельги на черемухе и можжевельнике, находились трехдневные птенцы: в одном – 3 живых, в другом – 4 мертвых, облепленных муравьями. Осенняя миграция особенно интенсивно идет в середине августа: 11–15.08.1999 у пос. Вершинина поймано 32 сеголетка с линькой (4–6-я стадии) и один перелинявший; 27.08–03.09.1996 в трех пунктах поймано только 6 птиц (4–6-я стадии).

40. **Черноголовая славка – *S. atricapilla* (L.).** Редкий вид, обитающий на северном пределе распространения. Пение отмечено 05.07.1997 у оз. Монастырского и 12.07.1997 у д. Поча. Вероятность гнездования подтверждает отлов у д. Морщихинской 28.08.1996 молодой самки, интенсивно меняющей гнездовой наряд. Взрослая птица, заканчивающая линьку, поймана в пос. Вершинина 01.09.1996.

41. **Серая славка – *S. communis* Lath.** Обычный немногочисленный гнездящийся и пролетный вид. Обитатель открытого ландшафта. Держится в высокотравье и куртинах кустарников среди лугов и полей. У каждой деревни на лугах обычно пело по 1–3 самца. Пара с кормом встречена 10.07.1997 у пос. Вершинина. Четыре молодые птицы с интенсивной линькой пойманы в пос. Вершинина 12–13.08.1999, 3 молодые, заканчивающие смену наряда, – в трех пунктах 28.08–03.09.1996.

42. **Славка-завирушка – *S. curruca* (L.).** Обычная для региона птица, редкая в парке. Пение зарегистрировано только 02.06.1997 у д. Морщихинской (2), тревоги – 27.07.1995 в д. Кривцово и 05.06.1997 у оз. Монастырского. Старые гнезда (одно разоренное) найдены на можжевельниках у д. Федоровской 20.07.1995. Молодые птицы, почти завершившие линьку, пойманы у пос. Вершинина 13–15.08.1999 (2), 01.09.1996 (1).

43. **Весничка – *Phylloscopus trochilus* (L.).** Массовый гнездящийся и пролетный вид. Населяет лесные угодья разных типов. В парке в оптимальных местообитаниях численность превышает 100 пар/км². На тропе № 1 11.06.1997 пело 8,1 самца / км (90 пар/км²). В пос. Вершинина 11–15.08.1999 отловлено 26 молодых птиц, в основном во второй половине линьки, а также 5 взрослых на 7–11-й стадиях линьки. К концу месяца интенсивность миграции падает: 27.08–03.09.1996 пойманы лишь три завершающих линьку особи и одна перелинявшая. В конце сентября в лесу еще встречались отдельные птицы (23.09.2001 у Лекшмозера).

44. **Теньковка – *Ph. collybita* (Vieill.).** Обычный, но малочисленный в регионе вид. Предпочитает хвойные и смешанные леса с преобладанием ели. В парке численность явно не соответствует обилию подходящих биотопов. В гнездовое время в 1995 и 1996 годах – по 2 встречи, в 1997 году – 8 встреч, в том числе выводка (06.07). Оперение трех сеголетков, пойманных в августе – сентябре, находилось на разных этапах замены: у одной особи 13.08.1999 признаки линьки отсутствовали, у второй оно находилось на ее средних стадиях; 02.09.1996 отловлена особь, только начавшая смену наряда. Осеннее пение (2) отмечено у оз. Монастырского 22.09.2001. Поздние встречи в 2000 году – 30.09 у д. Морщихинской (1) и 02.10 у пос. Вершинина (2 особи, одна пыталась петь).

45. **Пеночка-трещотка – *Ph. sibilatrix* (Bechst.).** Малочисленный вид южного происхождения. Обитает в парке, главным образом на участках светлого высокоствольного разреженного леса. Численность резко колеблется по годам. В 1995 и 1996 годах встречи единичны. В 1997 году на каждые 10 км маршрута по лесным угодьям приходилось от 0,5 до 3 поющих самцов. На тропе № 1 11.06.1997 пело 8 птиц (10 пар/км²), а 09.07 отмечено 3 гнездовые тревоги. Беспокоящаяся пара встречена также у д. Поча 12.07.1997, пара с летным выводком – у мельницы на р. Порженке 18.07.1995. Более поздних встреч и отловов не было.

46. **Таловка – *Ph. borealis* (Blas.).** Редкий в регионе вид, находящийся на этих широтах на южном пределе гнездового ареала. В 1996 году пение регистрировали: 28.06 в окрестностях д. Морщихинской, 30.06 у оз. Сяргозера, 02.07 у д. Масельга. В 1997 году отмечали: 11.06 на маршруте № 1 (2), 05.07 у оз. Монастырского (2), 07.07 на тропе на Макарьи озера (1), 08.08.1999 у д. Морщихинской (1).

На возможность гнездования указывала интенсивная тревога самца на склоне Хижгоры 28.07.1996.

47. **Зеленая пеночка – *Ph. trochiloides* (Sund.).** Редкий вид, находящийся на северном пределе ареала. Встречи в парке единичны. Пение отмечали: 05.06.1997 у оз. Щучье, 11.06.1997 на тропе № 1, 02.07.1996 у д. Ожегово, 21.07.1995 у оз. Малого Порженского. Пара с выводком встречена у д. Видягино 20.07.1995. Попытки молодых самцов петь зарегистрированы 25.07.1995 у западной границы парка (дорога на пос. Поча).

48. **Желтоголовый королек – *Regulus regulus* (L.).** Обычный гнездящийся и массовый пролетный вид. Входит в число фоновых видов в смешанных и еловых лесах парка. Поздняя встреча – 02.11.2002 [8].

49. **Серая мухоловка – *Muscicapa striata* (Pall.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Населяет широкий спектр биотопов, гнездится в населенных пунктах. На тропе № 1 11.06.1997 ее численность составила 3,3 пары/км (34 пары/км²); 12.07 она отнесена к массовым видам на заболоченных берегах р. Гузеньки. Большинство птиц отлетают к середине августа. В этом месяце поймано всего 7 особей: 12.08.1999 – взрослая (4-я стадия), 29.08–01.09.1996 – 6 молодых, заканчивающих линьку.

50. **Мухоловка-пеструшка – *Ficedula hypoleuca* (Pall.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Населяет леса разных типов. Наряду с естественными дуплами использует для гнездования скворечники и дуплянки. Весной 2002 года пение отмечено у д. Морщихинской уже 02.05. Летом 11.06.1997 на 1 км маршрута № 1 приходился один поющий самец. Два гнезда с птенцами найдены в пос. Вершинина 10.07.1997, тревога пары – 12.07 у пос. Поча. Большинство птиц отлетают к началу августа. В 1999 году после 11.08 отловлена лишь одна молодая птица, почти закончившая смену наряда к 13.08.

51. **Малая мухоловка – *Siphia parva* (Bechst.).** Редкий вид на северном пределе ареала. Встречи единичны. Пение слышали: 30.06.1996 у юго-западной границы парка (2 на 14 км), 04.06.1997 у болота Щучьи Глади (2), 11.06.1997 на тропе № 1 (2), 27.07.2002 у д. Федоровской (сообщение С. Рыковой). Гнездовые тревоги отмечали 18 и 22.07.1995 у мельницы на р. Порженке, 01.07.1996 и 05.07.1997 у оз. Монастырского, 11.07.1997 за д. Усть-Поча. Пара у гнезда, только покинутого слетками, обнаружена по дороге на оз. Макарьи 06.07.1997, пара с хорошо летающими птенцами (не менее 2) – у д. Видягино 17.07.1995.

52. **Ополовник – *Aegithalos caudatus* (L.).** Вид южного происхождения, редкий на гнездовании и обычный на пролете. В отдельные годы зимует [8]. Весной встречен 01.05.2002 за д. Орлово. Единственная летняя встреча – 06.07.1997 у мельницы по дороге на оз. Макарьи (пара с кормом). Осенью мигрирует в сентябре – начале октября. В 2001 году выраженный пролет наблюдали уже 06.09 у оз. Монастырского, а также 21 и 23.09 у д. Морщихинской. В 2000 году он начался только во второй половине сентября: 27.09–02.10 ежедневно отмечали пролет особей и стаек (до 20 птиц) в южном и западном направлениях.

53. **Пухляк – *Parus montanus* Bald.** Обычный гнездящийся и зимующий вид. Распределен по лесным угодьям парка почти равномерно (около 10 пар/км²). Выводки появляются в начале июня. Гнездовая тревога пары отмечена у болота Щучьи Глади 04.06.1997. Две молодые птицы во второй половине линьки отловлены 14.08.1999, 5 особей, завершающих смену наряда, – 02–03.09.1996.

54. **Московка – *P. ater* L.** Редкий в регионе гнездящийся вид. Встречен только в 2000 году во время осенних перемещений: 08.09 – у Лекшмозера и оз. Монастырского, 01.10 – между деревнями Масельга и Думино.

55. **Хохлатая синица – *P. cristatus* L.** Малочисленная гнездящаяся и зимующая птица. В парке редка, несмотря на обилие подходящих местообитаний. Летом встречена лишь 18.07.1995 в сосняке на тропе № 1 (голос) и 25.07 за Шалмозером (тревога). Осенью двух птиц видели за д. Масельга 01.10.2000. Встречена также 30.10.2002 [7].

56. **Большая синица – *P. major* L.** Обычный гнездящийся и зимующий вид. В парке встречен только у населенных пунктов: 19.07.1995 в д. Видягино, в 1997 году у д. Морщихинской 03.06 (тревога), в пос. Вершинина 10.07 (выводок), у д. Усть-Поча 11.07 (выводок). После гнездования часто объединяется с другими синицами: голоса регистрировали в смешанных стайках в Святой Роще у пос. Вершинина 31.08.1996 и 11.08.1999, нераспавшийся выводок больших птенцов – 14–15.08.1999. Отловлены: взрослые самец (3-я стадия) в д. Морщихинской 28.08.1996 и самка (5-я стадия) в пос. Вершинина 01.09.1996, три молодые птицы (3-я стадия) 11–15.08.1999, четыре (4–7-я стадии) 28.08–02.09.1996. Осенью 08, 27 и 30.09.2000 отмечены в стайках с лазоревками у д. Морщихинской.

57. **Лазоревка – *P. caeruleus* L.** Редкий гнездящийся и зимующий вид. Находится на северной периферии ареала. В гнездовой период встречена 02.06.1997 в д. Морщихинской, 03.06.1997 у д. Масельга (тревога пары), 10.06.1997 в д. Першлахта (тревога самца), 27.07.1995 в пос. Вершинина. Два выводка встречены в пос. Вершинина 14–15.08.1999: один включал не менее 6 подросших молодых птиц, другой – птенцов с короткими хвостами. Осенью лазоревок изредка отмечали в разных пунктах в стайках синиц 07–09.09 и 28.09–02.10 в 2000 году, 21 и 23.09 в 2001 году. Зарегистрирована зимой [8].

58. **Поползень – *Sitta europaea* L.** Очень редкий вид, находящийся в регионе на северном пределе распространения. Возможно, изредка гнездится на территории парка. Одна птица встречена В. Высоцким на берегу Лекшмозера 23.09.2001. В. Нефедов встречал по одной птице в окрестностях д. Морщихинской в 1995 и 2001 годах, в том числе зимой.

59. **Пищуха – *Certhia familiaris* L.** Немногочисленный гнездящийся и зимующий вид. Чаще встречается в юго-западной части парка, где 30.06.1996 на маршруте в 14 км (спелые хвойные и смешанные древостои) отмечены: один поющий самец, 2 одиночные особи и 4 пары с выводками. Выводки найдены также 11.06.1997 и 09.07.1997 на тропе № 1, 07.07.1997 у мельницы по дороге на оз. Макарьи, 12.07.1997 у пос. Поча. Две молодые особи, завершавшие линьку, отловлены в Кривцово 02 и 03.09.1996. Осенью одиночных птиц встречали у пос. Вершинина и между д. Думино и Порженскими озерами 01.10.2000. Отмечена зимой [8].

60. **Обыкновенная овсянка – *Emberisa citrinella* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. В парке держится по окраинам сельхозугодий, в жилых и брошенных деревнях. Пары с кормом встречены 01.07.1996 у д. Морщихинской и 10.07.1997 у пос. Вершинина. Сеголеток,

начинающий линьку, отловлен 14.08.1999. Оперение молодых птиц (16), пойманных 27.08–02.09.1996, находилось на разных этапах замены от ее начала до завершения, у двух взрослых самцов 28.08 и 03.09.1996 – на 7 и 10-й стадиях. Массовый пролет – в конце августа – сентябре, отдельные особи могут задерживаться до снегопадов.

61. **Садовая овсянка – *E. hortulana* L.** Редкий вид на северном пределе ареала. Поющий самец зарегистрирован в пос. Вершинина 16.07.1995.

62. **Овсянка-крошка – *E. pusilla* Pall.** Редкий северотаежный вид на южном пределе ареала. Найдена на болотце с карликовой березой у д. Морщихинской: 29.06.1996 зарегистрирован поющий самец, 03.07 – пара с выводком (15–16 дней). Пение отмечено там же 01.05.2002.

63. **Овсянка-ремез – *E. rustica* Pall.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. В гнездовое время встречалась в парке регулярно, но в очень небольшом числе. Возможно, депрессия численности вида, наблюдаемая в последние десятилетия в Карелии, распространилась и на эти территории. Наибольшее число встреч (5) – 11.06.1997 на тропе № 1 и 02.07.1996 по дороге Думино – Ожегово (2 выводка и 2 поющих самца). Выводки разного возраста встречены также 21.07.1995, 09 и 12.07.1997, 08.08.1999. В отловы 27.08–03.09.1996 попало 5 молодых птиц (одна перелинявшая и 4 завершающие линьку).

64. **Дубровник – *E. aureola* Pall.** Малочисленный гнездящийся и пролетный вид. Обитатель прибрежных высокотравных лугов. Запоздалой весной 1997 года, в первой декаде июня, еще шел интенсивный пролет, и 10.06 у д. Першлахта пело так много самцов, что вид вошел в число фоновых. Их пение отмечено также 05–11.06 у деревень Зихново, Видягино, Труфаново (по 1). В гнездовой период птиц видели: в 1997 и 1999 годах у пос. Вершинина, в 1995 и 1997 годах у д. Федоровской, в 1997 году у д. Першлахта и Гамозера (Усть-Поча). Выводки встречены 18–21.07.1995 у оз. М. Порженского, 10.07.1997 в пос. Вершинина, 14.07.1997 в д. Першлахта. Концентрация десятков птиц и выраженный пролет отмечены 24.07.1995 у д. Кривцово, поздняя встреча сеголетка – 10.08.1999 у пос. Вершинина.

65. **Камышевая овсянка – *E. schoeniclus* (L.).** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Фоновая птица побережий водоемов парка. Выводки встречали в течение июня и июля, поздняя дата – 12.08.1999 у д. Федоровской. Массовый пролет – в конце августа – сентябре. Наиболее интенсивная подвижка отмечена у пос. Вершинина 01.09.1996. При отловах 29.08–03.09.1996 поймано 23 молодых птицы (1–5-я стадии) и взрослый самец (10-я стадия). 27.09–02.10.2000 пролет еще шел и по утрам, в д. Морщихинской у скотного двора кормились стайки числом более 20 птиц.

66. **Пуночка – *Plectrophenax nivalis* (L.).** Обычна на пролете. По сообщениям жителей, в конце марта – начале апреля большие стаи птиц регулярно останавливаются у пос. Вершинина, деревень Морщихинская и Першлахта. Осенью стайки отмечали 02–03.11.2002 [7].

67. **Зяблик – *Fringilla coelebs* L.** Доминирующий вид, массовый на гнездовании и пролете. Населяет леса всех типов. На отдельных участках парка численность превышает 120 пар/км², и с одного места можно слышать сразу 3–5 самцов. По тропе № 1 11.06.1997 учтено 12,1 самца/км (90 пар/км²). Интенсивные осенние перемещения идут с конца августа и весь сентябрь. Так, если 11–15.08.1999 в отловы попала только одна птица (в гнездовом наряде), то 27.08–03.09.1996 – 70 сеголетков (в основном в середине линьки) и 30 взрослых (большинство в конце линьки). В начале октября 2000 года зяблики еще регулярно в небольшом числе встречались в лесах парка.

68. **Юрок – *F. montifringilla* L.** Малочисленный, не ежегодно гнездящийся и массовый пролетный вид. Находится на южной периферии гнездового ареала. Численность резко колеблется по годам. В 1995 году встреч не было. В следующем, 1996 году на каждые 10 км маршрута по лесным угодьям 28.06–08.07 приходилось от 5 до 8 поющих самцов, а 8.07 отмечена самка, кормящая птенцов. В 1997 году численность упала – всего 15 встреч, в основном в южной части парка. Самка в конце линьки (9-я стадия) отловлена у д. Морщихинской 27.08.1996. В 2001 году в конце сентября шел интенсивный пролет: 23.09 у д. Морщихинской останавливались стаи по 200–500 птиц (моновидовые и с зябликами). В 2000 году, в начале октября, встречено всего несколько особей.

69. **Зеленушка – *Chloris chloris* (L.).** Малочисленный вид, находится в регионе на северной периферии ареала. Встречена только у крупных поселений – Вершинина и Морщихинская. Летом здесь регистрировали: пение (2 самца 02.06.1997), голоса и одиночных птиц (13.07.1997, 11.08.1999, 31.08.1996, 02 и 11.09.2003), группы по 5–8 особей (01.07.1996, 10.08.1999, 28.08 и 01.09.1996). Пара с плохо летающими птенцами (не менее 3) встречена у пос. Вершинина 12.08.1999.

70. **Чиж – *Spinus spinus* (L.).** Обычный гнездящийся и массовый пролетный вид. Встречается во всех лесах парка, предпочитает высокоствольные еловые и смешанные леса. Попал 04.06.1997 в число фоновых видов между Труфаново и Щучьей Гладью. На маршруте № 1 11.06.1997 учтено 20 птиц, из них только 2 – в 50-метровой полосе. Молодой самец (3-я стадия) отловлен 28.08.1996. Миграции зависят от ситуации с кормами. Так, в 1995 году у д. Кривцово массовый пролет шел уже 24.07. А в 2000 году много птиц держалось в лесах лекшмозерской части парка (29.09–02.10) и одновременно шел интенсивный пролет стай в юго-западном направлении.

71. **Щегол – *Carduelis carduelis* (L.).** Редкий гнездящийся и пролетный вид. В парке обитает в основном у населенных пунктов. Весной 02.05.2002 щеглы уже держались у фермы в д. Морщихинской. В июне – августе особи, пары и группы до 10 птиц ежегодно встречались у д. Морщихинской и пос. Вершинина. Отмечены также в д. Зихново 10–11.06.1997 (пара и голоса), в д. Кривцово 24 и 26.07.1995 (голоса), у Гамозера 12.07.1997 (пара), у д. Видягино 17.07.1995 (по 1–4 в высокотравье). Выводки встречены 11.08.1999 в пос. Вершинина (4 птенца 18 дней) и 28.08.2002 в д. Морщихинской (птенец 16–18 дней). На осеннем пролете вполне обычны. Стайки по 3–30 птиц ежедневно наблюдали у пос. Вершинина и д. Морщихинской 27.09–02.10.2000, 21.09–09.10.2001, а вдали от жилья – за пос. Вершинина 28.09.2000 (10 особей) и у Порженских озер 02.10.2000 (4). Зарегистрирован в парке зимой [8].

72. **Чечетка – *Acanthis flammea* (L.).** Северный вид, редкий на гнездовании и массовый на пролете. Отмечен в парке зимой 19.01.2001 [8]. Гнездится не ежегодно.

Входил в число фоновых видов в 1995 году: 17–24.07 наблюдали интенсивную подвижку групп до 10 птиц по краю полей у деревень Видягино, Кривцово, пос. Вершинина, Порженских озер. С 26.07 у д. Кривцово отмечено массовое пение и токовые полеты, указывавшие на подготовку птиц к позднему размножению. В 1996–1997 годах летние встречи единичны, но отдельные пары, вероятно, размножались: 27.08–02.09.1996 пойманы 2 самца (4-я и 5-я стадии), сеголеток в гнездовом наряде и второй – с интенсивной линькой. В 1999 году регулярный пролет по 5–10 птиц отмечен только после 15.08. Осенью 28.09–02.10.2000 птицы летели небольшими группами в течение светлого времени, но пролет не был активным. Сходная ситуация отмечена 21 и 23.09.2001.

73. **Коноплянка** – ***Cannabina cannabina* (L.).** Редкий в регионе вид, находится на северной периферии ареала. Встречен 07.07.1996 в окрестностях д. Морщихинской (голоса) и 01–02.09.1996 в пос. Вершинина в стайке воробьев (2 молодые птицы). Еще одна птица встречена за пределами парка у д. Аверкиевской 09.08.1999.

74. **Чечевица** – ***Carpodacus erythrinus* (Pall.).** Обычный, но немногочисленный гнездящийся и пролетный вид. Встречается в основном в окрестностях деревень, в приопушечной полосе леса и куртинах деревьев и кустарников среди полей. Гнездится с середины июня, выводки встречаются в июле – августе. Большинство птиц отлетает к концу августа. При отловах 11–15.08.1999 пойманы 8 молодых птиц, 27.08–03.09.1996 – 2 особи (28.08 и 01.09).

75. **Щур** – ***Pinicola enucleator* (L.).** Малочисленный зимующий вид. Стайка из 10 птиц отмечена в парке 02.11.2002 [7].

76. **Клест-сосновик** – ***Loxia pityopsittacus* Borkh.** Малочисленный гнездящийся, пролетный и зимующий в регионе вид. Отмечен 18.07.1995 у оз. Большого Порженского (6 особей), 07.07.1997 у Макарьих озер (голоса), а также, по сообщению Й. Хогмандера, 09.09.2000 у д. Масельга (3 птицы).

77. **Клест-еловик** – ***L. curvirostra* L.** Обычный гнездящийся, пролетный и зимующий вид. Численность зависит от обилия семян ели. Летом выводки и стайки широко кочуют в поисках корма. Массовые перемещения отмечены в парке в конце июля 1995 года, особенно интенсивные – 20–21.07 у Порженских озер и 24.07 у д. Кривцово. В 1996 году, в начале июля, встречались лишь небольшие группы и отдельные птицы. В 1997 году крупные стаи зарегистрированы только 04.06 у д. Труфаново. Осенью 27.09–3.10.2000 шла выраженная миграция, при этом много птиц задерживались в лесах парка из-за урожая семян ели.

78. **Белокрылый клест** – ***L. leucoptera* Gm.** Редкий гнездящийся, пролетный и зимующий в регионе вид. Находится у западной границы основного ареала. Голоса пролетающих птиц зарегистрированы только 18.07.1995 в д. Видягино.

79. **Снегирь** – ***Pyrrhula pyrrhula* (L.).** Обычный гнездящийся, пролетный и зимующий вид с низкой численностью. Населяет хвойные и смешанные леса. На тропе № 1 11.06.1997 – 5 встреч. Выводки отмечали с июня до конца августа. Пойманы: 15.08.1999 – взрослая самка (6-я стадия), при отловах 27.08–3.09.1996 – 1 взрослый самец (8-я стадия), одна молодая птица в гнездовом наряде и 2 – заканчивающие смену оперения.

80. **Домовый воробей** – ***Passer domesticus* (L.).** Обычный синантропный гнездящийся и зимующий вид. По численности заметно уступает полевому воробью. Встречен только в крупных населенных пунктах.

81. **Полевой воробей** – ***P. montanus* (L.).** Обычный синантропный гнездящийся, пролетный и зимующий вид. Гнездится в крупных населенных пунктах – пос. Вершинина, д. Морщихинской. В небольших деревнях и брошенных населенных пунктах не встречен.

82. **Скворец** – ***Sturnus vulgaris* L.** Обычный гнездящийся и пролетный вид. Весной скворцы прилетают в парк в начале апреля. В 1997 году, по сообщению Е. Синяговского, появились в пос. Вершинина еще 14.03 в оттепель, но в снегопад исчезли. В июле 1995 и 1996 годов зарегистрировано всего несколько встреч, тогда как в начале июня 1997 года скворцы обнаружены почти во всех скворечниках в д. Морщихинской и даже в дуплах старых деревьев у погоста в д. Федоровской. Птицы, кормившие птенцов, отмечены также в д. Першлахта и других деревнях. С июля, после подъема птенцов на крыло, собираются в стаи. Стая около 30 птиц отмечена 13.07.1997 в д. Усть-Поча, по 30–50 и 250 птиц – 14.08.1999 на полях у пос. Вершинина, 150 птиц, летевших на северо-восток, – там же 03.09.1996. Отлетают поздно: в конце сентября 2000 года еще встречались у д. Морщихинской и пос. Вершинина.

83. **Иволга** – ***Oriolus oriolus* (L.).** Редкий вид, находится на северном пределе ареала. Большинство встреч – в северной части парка. В 1995 году у д. Кривцово 24.07 пел один, а 27.07 – три самца; самка встречена в д. Федоровской 22.07. «Мяукающие» птицы отмечены: 11.06.1997 в деревнях Зихново и Видягино; 28.06.1996 на дороге к д. Масельга; 18.07.1995 в д. Видягино (возможно, выводок).

84. **Сойка** – ***Garrulus glandarius* (L.).** Обычный немногочисленный гнездящийся и зимующий вид. В гнездовой период осторожна и редко попадает на глаза. Осенью число встреч возрастает. Хорошо летающие выводки отмечены: 20.07.1995 у д. Федоровской (не менее 3 птенцов); 05.07.1997 и 13.08.1999 у оз. Монастырского. Зимой зарегистрирована у оз. Масельгского [8].

85. **Кукша** – ***Perisoreus infaustus* (L.).** Малочисленный гнездящийся в регионе и зимующий вид. Находится на южной периферии гнездового ареала. По сообщению В. Нефедова, кукши неоднократно попадали в капканы в зимнее время. Осенью А. Костылев встречал их между Порженскими озерами и д. Думино.

86. **Сорока** – ***Pica pica* (L.).** Обычный, но немногочисленный гнездящийся и зимующий вид. Держится отдельными парами преимущественно в окрестностях населенных пунктов. У д. Морщихинской найдены старые пустые гнезда, а 07.07.1996 – выводок, включавший не менее 3 птенцов с полностью отросшим оперением.

87. **Кедровка** – ***Nucifraga caryocatactes* (L.).** Залетный вид; возможно, изредка гнездится. Перья птицы, съеденной хищником зимой или осенью, найдены на болоте Щучьи Глади 05.06.1997.

88. **Галка** – ***Corvus monedula* L.** Обычный синантропный вид. Образует большие скопления (сотни птиц) в крупных населенных пунктах – пос. Вершинина, д. Морщихинской. По сообщениям жителей, численность галок резко падала в начале 1990-х, но в 2000-е начала быстро

расти, что связывают с сокращением применения минеральных удобрений.

89. **Грач – *C. frugilegus* L.** Вид, находящийся на северной периферии ареала. В парке не гнездится, но регулярно залетает с прилежащих территорий. Стая в 30 птиц встречена у д. Морщихинской 20.04.2002, одна птица – 02.06.1997. У пос. Вершинина по 1–2 птицы постоянно попадались в стаях галок 31.08–04.09.1996.

90. **Серая ворона – *C. cornix* (L.).** Обычный гнездящийся и зимующий вид. В гнездовой период пары распределяются по угодьям, проникая иногда даже вглубь лесных массивов, но большинство поселяется вблизи деревень и побережий водоемов. Осенью собираются у населенных пунктов, где часть птиц остается на всю зиму.

91. **Ворон – *C. corax* L.** Обычная, но малочисленная гнездящаяся и зимующая птица. В лесных угодьях в гнездовой период ежедневно регистрировали по 1–2 птицы. В. Нефедов встретил нелетающих слетков у оз. Салмозера. В конце лета семьи воронов можно видеть кормящимися у скотных дворов в стаях галок и серых ворон.

ПРИМЕЧАНИЕ

[1] Русские и латинские названия видов и их последовательность даны по [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. А. Находки в Архангельской области в 2002 году // Русский орнитологический журнал. 2002. Экспресс-выпуск. № 11 (200). С. 941.
2. Андреев В. А. Синехвостка *Tarsiger cyanurus* в Архангельской области // Русский орнитологический журнал. 2011. Экспресс-выпуск. № 20 (645). С. 667–668.
3. Бутьев В. Т., Шитиков Д. А., Федотова С. Е. Гнездовая биология северной бормотушки (*Hippolais caligata*, *Passeriformes*) на северном пределе ареала // Зоологический журнал. 2007. Т. 86. № 1. С. 81–89.
4. Иванов А. И. Каталог птиц СССР. Л.: Наука, 1976. 276 с.
5. Ивантер Э. В. Фаунистический анализ и зоогеографическое районирование территорий (на примере Карелии) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (105). С. 19–25.
6. Носков Г. А., Гагинская А. Р. К методике описания состояния линьки у птиц // Сообщение Прибалтийской комиссии по изучению миграций птиц. Тарту, 1972. Вып. 7. С. 154–163.
7. Плешак Т. В. К списку зимней орнитофауны Кенозерского национального парка // Русский орнитологический журнал. 2005. Экспресс-выпуск. № 14 (285). С. 351–352.
8. Плешак Т. В., Корепанов В. И. К зимней орнитофауне Кенозерского национального парка (Архангельская область) // Русский орнитологический журнал. 2001. Экспресс-выпуск. № 10 (142). С. 372–374.
9. Редькин Я. А. Заметки о сверчках *Locustella* (*Sylviidae*) Архангельской области // Русский орнитологический журнал. 1998. № 7 (32). С. 3–7.
10. Рымкевич Т. А., Савинич И. Б., Носков Г. А. и др. Линька воробьиных птиц Северо-Запада СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. 302 с.
11. Сазонов С. В. Птицы тайги Беломоро-Онежского водораздела. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 502 с.
12. Хохлова Т. Ю. Черный дрозд (*Turdus merula)* у северо-восточной границы ареала: особенности территориальных связей и миграций в период формирования периферийной популяции в Южной Карелии (обзор) // Зоологический журнал. 2010. Т. 89. № 2. С. 212–221.
13. Хохлова Т. Ю. Западносибирский черноголовый чекан *Saxicola torquata maura* Pall. в Каргополье (Архангельская область) // Русский орнитологический журнал. 2012. Экспресс-выпуск. № 21 (766). С. 1381–1383.
14. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В. Общая характеристика орнитофауны // Разнообразие биоты Карелии: виды, сообщества, формирование. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 139–150.
15. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В. Бормотушка *Hippolais caligata* в Карелии // Русский орнитологический журнал. 2008. Экспресс-выпуск. № 17 (403). С. 941.
16. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В. Орнитологические исследования Кенозерского государственного национального парка // Проблемы охраны и изучения природной среды Русского Севера: Материалы науч. – практ. конф., посвящ. 25-летию Государственного природного заповедника «Пинежский». Архангельск, 1999. С. 146–150.
17. Хохлова Т. Ю., Яковлева М. В., Артемьев А. В. Птицы Кенозерского национального парка (неворобьиные – non passerine) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 5 (99). С. 32–47.
18. Шатковская Е. Ф., Торхов С. В., Тормосов Д. В. и др. Природное и культурное наследие Кенозерского национального парка. Петрозаводск: ПетроПресс, 2002. 176 с.
19. Important Bird Areas in Europe: priority sites for conservation / Eds. M. F. Heath, M. I. Evans, D. G. Hoccom, A. J. Payne, N. B. Peet. Vol. 1. Northern Europe. Cambridge, UK: BirdLife International, 2000. 791 p.

Khokhlova T. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Yakovleva M. V., Natural reserve “Kivach” (Rural settlement Kivach, Republic of Karelia, Russian Federation)
Artem’ev A. V., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

BIRDS OF KENOZERO NATIONAL PARK (PASSERINE)

Data collected in 1995–2003 in Arkhangelsk region on the territory of Kenozero National Park (61°55’ 00 N, 38°07’ E), inside European and Siberian avifauna contact zone and within concentration ranges of northern and southern species, are generalized. Information on the status, numerical strength, and timing of seasonal events in the life of 91 passerine bird species is given. Avifauna is highly heterogeneous. Birds’ catching and nests’ finding confirmed reproduction of 60 species. The data also included rare types of birds located on the periphery of the area (Great Grey Shrike *Lanius excubitor*, Waxwing *Bombycilla garrulus*, Bluethroat *Cyanosylvia svecica*, Stonechat *Saxicola torquata*, Blackbird *Turdus merula*, Wood Warbler *Phylloscopus sibilatrix*, Greenish Warbler *Ph. trochiloides*, Red-breasted Flycatcher *Siphia parva*, Blue Tit *Parus caeruleus*, Little Bunting *Emberisa pusilla*, Brambling *Fringilla montifringilla*, Goldfinch *Carduelis carduelis*, Redpoll *Acanthis flammea* and others). The following species are registered in summer time: Red-Flanked Bluetail *Tarsiger cyanurus*, River Warbler *L. fluviatilis*, Grasshopper Warbler *L. naevia*, Lanceolated Warbler *Locustella lanceolata*, Great Reed Warbler *Acrocephalus arundinaceus*, Booted Warbler *Hippolais caligata*, Blackcap *Sylvia atricapilla*, Arctic Warbler *Ph. borealis*, Coal Tit *Parus ater*, Ortolan Bunting *E. hortulana*, Linnet *Cannabina cannabina*, Two-barred Crossbill *Loxia leucoptera*, Golden Oriole *Oriolus oriolus* and others.

Key words: : avifaune, breeding area, border of distribution, rare birds, Kenozero National Park, Archangelsk region

REFERENCES

1. A n d r e e v V. A. The findings in Arkhangelsk region in 2002 [Nakhodki v Arkhangel'skoy oblasti v 2002 godu]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2002. Express-issue. № 11 (200). P. 941.
2. A n d r e e v V. A. The red-flanked bluetail *Tarsiger cyanurus* in Arkhangelsk Oblast' [Sinekhvostka *Tarsiger cyanurus* v Arkhangel'skoy oblasti]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2010. Express-issue. № 20 (645). P. 667–668.
3. B u t ' e v V. T., S h i t i k o v D. A., F e d o t o v a S. E. Nesting biology of the Booted Warbler (*Hippolais calligata*, Passeriformes) within northern boundaries of its range [Ghezdovaya biologiya severnoy bormotushki (*Hippolais caligata*, Passeriformes) na severnom predele areala]. *Zoologicheskiy zhurnal* [Zoological journal]. 2007. Vol. 86. № 1. P. 81–89.
4. I v a n o v A. I. *Katalog ptits SSSR* [Catalogue of the birds of the USSR]. Leningrad, Nauka Publ., 1976. 276 p.
5. I v a n t e r E. V. Faunistic analysis and zoographic zoning of territories (on the example of Karelia) [Faunisticheskiy analiz i zoogeograficheskoe rayonirovanie territorii (na primere Karelii)]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 11 (105). P. 19–25.
6. N o s k o v G. A., G a g i n s k a y a A. R. On the method of registration of moult in birds [K metodike opisaniya sostoyaniya lin'ki u ptits]. *Soobshchenie Pribaltiyskoy komissii po izucheniyu migratsii ptits* [Proc. Of the Baltic Commission for the Study of Bird Migration]. Tartu, 1972. Issue 7. P. 154–163.
7. P l e s h a k T. V. To the list of winter avifauna of the Kenozersky National Park [K spisku zimney ornitofauny Kenozerskogo natsional'nogo parka]. *Russkiy ornitologicheskii zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2005. Express-issue. № 14 (285). P. 351–352.
8. P l e s h a k T. V., K o r e p a n o v V. I. To the bird fauna of the Kenozero National Park, Arkhangelsk Region [K zimney ornitofaune Kenozerskogo natsional'nogo parka (Arkhangel'skaya oblast')]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2001. Express-issue. № 10 (142). P. 372–374.
9. R e d ' k i n Ya. A. Notes on grass warblers *Locustella* (Sylvidae) of Arkhangelsk Region [Zametki o sverchkakh *Locustella* (Sylviidae) Arkhangel'skoy oblasti] // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 1998. Express-issue. № 7 (32). P. 3–7.
10. R y m k e v i c h T. A. *Lin'ka vorob'inykh ptits Severo-Zapada SSSR* [Moult of passerines of Northwestern of USSR]. Leningrad, LGU Publ., 1990. 302 p.
11. S a z o n o v S. V. *Ptitsy taygi Belomoro-Onezhskogo vodorazdela* [Birds of taiga of the watershed of the White Sea – Onega]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS, 2011. 502 p.
12. K h o k h l o v a T. Yu. Blackbird *Turdus merula* within northern borders of distribution: features of territorial connections and migrations during peripheral population development in southern Karelia (review) [Chernyi drozd (*Turdus merula*) u severo-vostochnoy granitsy areala: osobennosti territorial'nykh svyazei i migratsii v period formirovaniya periferiynoy populyatsii v yuzhnoy Karelii (obzor)]. *Zoologicheskiy zhurnal* [Zoological journal]. 2010. Vol 89. № 2. P. 212–221.
13. K h o k h l o v a T. Yu. The Siberiane stonechat *Saxicola torquata maura* in Kargopol' region (the Arkhangelsk Oblast') [Zapadnosibirskiy chernogolovyy chekan *Saxicola torquata maura* Pall. v Kargopol'e (Arkhangel'skaya oblast')]. *Russkiy ornitologicheskii zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2012. Express-issue. № 21 (766). P. 1381–1383.
14. K h o k h l o v a T. Yu., A r t e m ' y e v A. V. General characteristics of birds' fauna [Obshchaya kharakteristika ornitofauny]. *Raznoobrazie bioty Karelii: vidy, soobshchestva, formirovanie* [Biotic Diversity of Karelia: Conditions of formation, communities, and species]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS, 2003. P. 139–150.
15. K h o k h l o v a T. Yu., A r t e m ' e v A. V. The booted warbler *Hippolais caligata* in Karelia [Bormotushka *Hippolais caligata* v Karelii]. *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2008. Express-issue. № 17 (403). P. 941.
16. K h o k h l o v a T. Yu., A r t e m ' e v A. V., Y a k o v l e v a M. V. Ornithological studies in the Kenozero State National Park [Ornitologicheskie issledovaniya Kenozerskogo gosudarstvennogo natsional'nogo parka]. *Problemy okhrany i izucheniya prirodnoy sredy Russkogo Severa: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 25-letiyu Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Pinezhskiy"* [Protection and environmental study of North Russia. Proceedings of the Practical Scientific Conference held to celebrate the 25th anniversary of the founding of the Pinega State Strict Reserve, Pinega]. Arkhangel'sk, 1999. P. 146–150.
17. K h o k h l o v a T. Yu., Y a k o v l e v a M. V., A r t e m ' e v A. V. Birds of Kenozero National Park (non-passerine) [Ptitsi Kenozerskogo natsional'nogo parka (non-passerine)]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 5 (99) P. 32–47.
18. S h a t k o v s k a y a E. F., T o r k h o v S. V., T o r m o s o v D. V. et al. *Prirodnoye i kul'turnoye nasledie Kenozerskogo natsional'nogo parka* [Nature and culture heritage of Kenozero National Park]. Petrozavodsk, PetroPress Publ., 2002. 176 p.
19. Important Birds' Areas in Europe: priority sites for conservation / Eds. M. F. Heath, M. I. Evans, D. G. Hoccom, A. J. Payne, N. B. Peet. Vol. 1. Northern Europe. Cambridge, UK, BirdLife International, 2000. 791 p.

Поступила в редакцию 10.01.2012

Июнь, № 4 **Медицинские науки** **2013**

УДК 616.7

ФРАНЦ АЛЕКСАНДРОВИЧ МИСЮН
кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной хирургии, лор-болезней, офтальмологии, стоматологии, оперативной хирургии и топографической анатомии, заведующий курсом глазных болезней медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
transophttech@gmail.com

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ВАПИРОВ
доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vapirov@petrsu.ru

ИННА ЮРЬЕВНА ПОРОМОВА
кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной хирургии, лор-болезней, офтальмологии, стоматологии, оперативной хирургии и топографической анатомии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
poromova.5@yandex.ru

ИЛЬЯ ОЛЕГОВИЧ ГАВРИЛЮК
врач-интерн медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
iluaayaks@gmail.com

ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ МЕШКОВ
студент 5-го курса медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
walhgard@gmail.com

МОДЕЛЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХАЛЬКОЗА РОГОВИЦЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ*

На основании литературных данных по физико-химическим свойствам металлов, биохимии роговицы и результатов собственных экспериментальных исследований предложена модель физико-химических процессов, протекающих при халькозе роговицы.

Ключевые слова: металлоз, халькоз, травмы роговицы глаза

Среди причин травм переднего отрезка глаза инородные тела роговицы составляют от 40 до 69 % [1], [5], [6]. На промышленных предприятиях, занятых обработкой металла, частота этой травмы достигает до 95 % общего травматизма. Специфика этой травмы заключается в том, что прозрачная ткань роговицы повреждается не только при внедрении в нее микрочастицы, но и при хирургическом удалении инородного тела. При этом повреждение от хирургического вмешательства значительно превышает травму от внедрения микрочастицы.

Особое место среди травм роговицы глаза занимает поражение химически агрессивными инородными телами. При этом присоединяется еще один очень важный и опасный фактор – химическое поражение тканей роговицы. Химическое воздействие сохраняется и прогрессирует до тех пор, пока источник находится в роговице. Объемность поражения ткани и связанная с ней длительность лечения в итоге могут привести не только к значительному снижению остроты, но и потере зрения.

Несмотря на очевидную актуальность проблемы, травмы роговицы глаза химически агрессивными металлическими инородными телами не изучены ни экспериментально, ни клинически. Это обусловливает не этиопатогенетическое, а малоэффективное симптоматическое лечение.

Среди повреждений роговицы глаза химически агрессивными инородными телами на первое место выходят травмы железными и медными микрочастицами, поражение которыми получило название «металлоз». Этот термин широко применяется в офтальмологии, но его однозначное определение в литературе отсутствует. С нашей точки зрения, под металлозом следует понимать комплекс процессов, протекающих как со стороны инородного тела, так и со стороны структур тканей. Физико-химическое, морфологическое и клиническое изучение процессов, протекающих при металлозе, позволит понять механизм поражения и разработать патогенетически обоснованное лечение этой сложной травмы.

Целью настоящей работы является построение модели физико-химических процессов, протекающих при металлозе в роговице глаза. В качестве инородного тела нами выбрана медь. Ионы этого металла активируют целый ряд ферментов, в то же время катионы меди проявляют крайнюю токсичность для организма. Для создания модели мы использовали имеющиеся литературные данные по физико-химическим свойствам металла, биохимии роговицы, а также результаты собственных экспериментальных исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После фиксации кролика в станке и аппликационной анестезии роговицы под щелевой лампой микрохирургическим инструментом [3] на 12 часах в 1 мм от лимба под углом в поверхностных слоях роговицы формируется раневое ложе, в которое с помощью микроинструментов вводится микрочастица. Такое введение медных микрочастиц было проведено на 6 глазах кроликов породы шиншилла. В течение первых 5 часов биомикроскопия и фотофиксация проводились ежечасно.

Так как экспериментальное воспроизведение металлоза в литературе не описано, Ф. Я. Мисюном была впервые разработана и применена технология воспроизведения металлоза роговицы глаза в эксперименте. Данная технология включает разработку и изготовление:

- микрочастиц меди размером 0,1 × 0,12 мм,
- микрохирургического инструмента для формирования ложа для микрочастицы,
- инструмента для внедрения микрочастиц в микроскопическую рану роговицы,
- станка с жесткой фиксацией кролика для проведения микрохирургических операций на роговице глаза.

Данные инновационные разработки в настоящее время проходят патентную защиту.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К концу первого часа после внедрения микрочастицы меди ее поверхность теряет блеск, а в прилегающей ткани появляется инфильтрация с легким голубоватым оттенком, которая свидетельствует о наличии катионов меди. С течением времени отечность, диаметр инфильтрационного пятна и интенсивность окраски возрастают. Схематически процесс халькоза во времени представлен на рисунке. Отметим, что, согласно литературным данным, у больных после травмы металлическими инородными телами развитие металлоза наблюдали спустя более 20 часов после травмирования, в нашем же эксперименте мы впервые фиксировали развитие этого процесса уже к концу первого часа после внедрения металла.

а б

Схема динамики развития халькоза роговицы в эксперименте: а – 1 час после внедрения, б – 5 часов после внедрения

При моделировании физико-химических процессов халькоза в первую очередь следует учесть и объяснить возможность ионизации меди в биологической среде роговицы. Общеизвестно, что медь является малоактивным металлом, о чем свидетельствует восстановительный потенциал редокс-пары: $\varphi^{o}Cu^{2+}/Cu$ = 0,337 В [2]. Указанное положительное значение восстановительного потенциала предусматривает отсутствие ионизации этого металла в воде. В то же время при внедрении меди в ткани роговицы уже в первый час наблюдается выход катионов металла из узлов его кристаллической решетки в раствор. Таким образом, физико-химические особенности биологической среды роговицы определяют существенную возможность ионизации металла, которая практически отсутствует в воде и многих водных растворах.

Относительная инертность меди исключает ее ионизацию даже в кислой среде, за исключением взаимодействия с кислотами-окислителями. Таким образом, pH среды роговицы, близкая к нейтральной, ни в коей мере не может способствовать ионизации данного металла.

К наиболее значимым процессам, способствующим ионизации меди в растворе, следует отнести возможность комплексообразования катиона металла с белками и другими биологическими лигандами. Известно, что катионы меди связываются с белком транскупреином [4] и альбумином в соотношении 2:1. В меньшей степени медь связывается с аминокислотами, преимущественно с гистидином. Из плазмы крови человека также выделен связанный с медью или железом трипептид – глицилгистидиллизин, ассоциированный с альбуминовой и α-глобулиновой фракциями. Существует мнение, что указанный комплекс обеспечивает поступление меди и железа внутрь клеток в нетоксичной и доступной форме. Приведенные литературные данные свидетельствуют о сродстве катионов меди к биологическим лигандам. В этих условиях белки, аминокислоты и другие лиганды должны связывать катионы меди в растворе, вследствие чего происходит смещение равновесия в сторону ионизации металла, однако для этого катионы меди должны вырваться из узлов кристаллической решетки металла. Белки, являясь высокомолекулярными соединениями, могут адсорбироваться на поверхности металла. Взаимодействие белков с катионами меди поверхностного слоя металла должно приводить к их связыванию, вследствие чего выделяется энергия, ослабляется связь катионов с электронами, что должно являться первопричиной выхода катиона металла в раствор. Однако для такого малоактивного металла, как медь, этот процесс маловероятен. Следует отметить, что появление катионов меди в растворе наблюдается в поверхностном слое роговицы, где присутствует растворенный в биологической жидкости кислород. В этом случае наиболее вероятным представляется процесс окисления меди растворенным кислородом, а роль белка сводится к переводу нерастворимого оксида в растворимый комплексный катион.

Таким образом, медьсвязывающие белки, по нашему мнению, играют ключевую роль в процессе растворения меди при поражении этим металлом роговицы.

Следует отметить, что ионная импрегнация ведет к большему отеку роговицы по сравнению с поражением химически неактивным субстратом. Вероятнее всего, это связано с тем, что в случае химически активного субстрата в растворе появляются катионы, которые локально изменяют осмотическое давление. Ионный участок в этом случае становится гиперосмотическим, что приводит к направленному движению воды в данную область.

Фракции белков, связанных с медью, являются доступными для тканей и в случае избытка могут легко накапливаться в них и вызывать ряд патохимических процессов. Среди них – угнетение мембранной АТФазы и ингибирование некоторых ферментов и кофакторов, содержащих сульфгидрильные группы. Избыток меди угнетает активность цитохромоксидазы и аминоксидазы.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гундорова Р. А., Степанов А. В., Курбанова Н. Ф. Современная офтальмология. М.: ОАО «Издательство “Медиана”», 2007. 256 с.
2. Инструмент для удаления инородных тел с поверхности роговицы глаза. Патент на полезную модель № 58144 от 10 мая 2006 г. Патентообладатель Ф. А. Мисюн.
3. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология / А. П. Авцын, А. А. Жаворонков, М. А. Риш, Л. С. Строчкова; АМН СССР. М.: Медицина, 1991. 496 с.
4. Справочник химика / Под ред. Б. П. Никольского. Т. 3. Госхимиздат, 1952. 1191 с.
5. Monestam E. Eye injuries in Northern Sweden // Acta Ophthalmologica. 1991. Vol. 69. P. 1–5.
6. Pheng Fong L. Eye injuries in Victoria, Australia // Med. J. Aust. 1995. Vol. 162 (2). P. 64–68.

Misyun F. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vapirov V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Poromova I. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Gavrilyuk I. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Meshkov V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MODEL OF CHEMOPHYSICAL PROCESSES OF CORNEAL CHALCOSIS IN EXPERIMENT

On the basis of excessive literature data pertaining chemophysical metal properties, corneal biochemistry, and results of our experimental trials a model of chemophysical processes taking place in corneal chalcosis is proposed.

Key words: metalosis, chalcosis, eye corneal injuries

REFERENCES

1. Gundorova R. A., Stepanov A. V., Kurbanova N. F. *Sovremennaya oftal'mologiya* [The Modern Ophthalmology]. Moscow, OAO Publishing House “Mediana”, 2007. 256 p.
2. *Instrument dlya udaleniya inorodnykh tel s poverkhnosti rogovitsy glaza* [A device to remove foreign bodies from the cornea of the eye]. Patent for useful model № 58144. May 10, 2006. Patent possessor F. Misyun.
3. *Mikroelementozy cheloveka: etiologiya, klassifikatsiya, organopatologiya* [Human microelements: etiology, classification, organ pathology] / A. P. Avtsyn, A. A. Zhavoronkov, M. A. Rish, L. S. Strochkova; AMS USSR. Moscow, Meditsina Publ., 1991. 496 p.
4. Spravochnik khimika [Chemistry Reference Book] / Ed. B. P. Nikol'skiy. Vol. 3. State Chem. Publishing House, 1952. 1191 p.
5. Monestam E. Eye injuries in Northern Sweden // Acta Ophthalmologica. 1991. Vol. 69. P. 1–5.
6. Pheng Fong L. Eye injuries in Victoria, Australia // Med. J. Aust. 1995. Vol. 162 (2). P. 64–68.

Поступила в редакцию 24.05.2013

Июнь, № 4 **Медицинские науки** **2013**

УДК 616.12-008.331.1-08.039-57

ГЕННАДИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ УСЕНКО
доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии и клинической фармакологии лечебного факультета, Новосибирский государственный медицинский университет (Новосибирск, Российская Федерация)
usenko1949@mail.ru

АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ УСЕНКО
кандидат медицинских наук, врач кабинета функциональной диагностики, Новосибирский областной госпиталь № 2 ветеранов войн (Новосибирск, Российская Федерация)
h2w@mail.ru

ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ ВАСЕНДИН
кандидат медицинских наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института кадастра и природопользования, Сибирская государственная геодезическая академия (Новосибирск, Российская Федерация)
vasendindv@gmail.com

СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ИВАНОВ
врач отделения функциональной диагностики, Государственная новосибирская областная клиническая больница (Новосибирск, Российская Федерация)
gnokb@oblmed.nsk.ru

НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА ВЕЛИЧКО
врач-терапевт, Детская городская поликлиника № 1 (Новосибирск, Российская Федерация)
zdrav-dgp1@novo-sibirsk.ru

ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ НИЩЕТА
врач-терапевт амбулатории (пос. Кудряши, Новосибирский район, Новосибирская область, Российская Федерация)
afeuckoooa@gmail.com

ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА КОЗЫРЕВА
врач-терапевт Межрегионального ожогового центра, Государственная новосибирская областная клиническая больница (Новосибирск, Российская Федерация)
gnokb@oblmed.nsk.ru

УСПЕХ СНИЖЕНИЯ МАССЫ МИОКАРДА ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА У БОЛЬНЫХ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ ТЕМПЕРАМЕНТОМ И УРОВНЕМ ТРЕВОЖНОСТИ

Цель работы – оценка эффективности целенаправленной антигипертензивной терапии (Ц-АГТ), основанной и не основанной (Э-АГТ) на коррекции симпатикотонии у пациентов с холерическим (Х) и сангвиническим (С) темпераментом, а также активности ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РААС) у флегматиков (Ф) и меланхоликов (М) на примере снижения массы (ММЛЖ) и индекса массы (ИММЛЖ) миокарда левого желудочка (ЛЖ). Исследовали мужчин (средний возраст 54,2 ± 1,8 года): 447 здоровых и 824 пациента, страдающих АГ-II в течение 11,6 ± 1,4 года, с превалированием Х-, С-, Ф- и М-темперамента с высокой (ВТ) и низкой (НТ) тревожностью. Депрессивность легкой степени обнаружена только у ВТ/Ф и ВТ/М. В течение 18 месяцев лица основной группы Х и С получали β-адреноблокаторы (БАБ) + диуретик + анксиолитик (сибазон), а Ф и М – ингибиторы ангиотензинпревращающего фермента (иАПФ) + диуретик + антидепрессант (коаксил) (варианты Ц-АГТ). Лица группы сравнения получали такие же препараты и дозы, но ВТ (НТ) Х и С – иАПФ, а Ф и М – БАБ. В отличие от Э-АГТ, Ц-АГТ сочеталась с более ранним (на 6 месяцев) и более выраженным приближением ММЛЖ, ИММЛЖ, систолической и диастолической функции к таковым у здоровых лиц соответствующего темперамента и тревожности.

Ключевые слова: гипертония, психосоматический статус, снижение гипертрофии левого желудочка

Гипертоническая (ГБ) и ишемическая болезнь сердца (ИБС) занимают ведущее место в структуре заболеваемости и смертности трудоспособного населения [9]. Психологическое, физиологическое напряжение сочетаются со смещением равновесности отделов вегетативной нервной системы (ВНС) в сторону превалирования симпатического (SNS), повышением содержания кортизола и альдостерона в крови и снижением содержания инсулина и времени свертывания [6], [10]. У ряда больных ГБ или ИБС эти процессы приводят к развитию острого инфаркта миокарда или острого нарушения мозгового кровообращения с транзиторным или фатальным исходом [4]. В современных условиях усилия антигипертензивной терапии (АГТ) направлены на блокаду гиперсимпатикотонии, активности ренин-ангиотензин-альдостероновой системы, коррекцию нарушений гомеостаза [3]. Однако иАПФ и БАБ назначаются эмпирически, без уточнения баланса отделов ВНС, превалирования РААС над активностью гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы (ГГНС) или наличия тревожности, депрессивности. Несмотря на успехи АГТ, эффективность лечения часто ниже ожидаемой [3], [13]. К причинам снижения терапевтического эффекта можно отнести низкую приверженность больных к лечению и недостаточное внимание врачей к особенностям психосоматического статуса больного при назначении терапии: назначаются фиксированные и нефиксированные группы гипотензивных средств одной большой группе больных ГБ, редко разделяя ее по особенностям психосоматического статуса. Накопленный опыт показывает возможность адресного назначения препаратов с учетом особенностей психосоматического статуса пациента по темпераменту, тревожности [9], а также блокирующих нежелательные сдвиги в ВНС, РААС и ГГНС.

Цель работы – оценить эффективность АГТ, основанной и не основанной на целенаправленной коррекции симпатикотонии у одних больных и активности РААС – у других на примере снижения массы миокарда левого желудочка.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период с 1999 по 2012 год в условиях поликлиники обследованы 824 инженерно-технических работника (ИТР) – мужчины в возрасте 44–62 лет (54 ± 1,8 года), у которых обнаружена ГБ-II, степень 2, риск 3. Длительность заболевания – 11,6 ± 1,4 года. Наличие эссенциальной АГ устанавливали по критериям [5]. У ИТР отсутствовали проявления сопутствующей патологии. Контролем служили 447 здоровых мужчин, совместимых по основным антропосоциальным показателям. Все исследования проводили с 8.00 до 10.00 утра, натощак. Превалирующий темперамент – холерический, сангвинический, флегматический и меланхолический – определяли с использованием психологического теста Дж. Айзенка и А. Белова [7] путем 3-кратного тестирования до лечения (0) и через 3, 6, 9, 12 и 18 месяцев АГТ. Прямой аналогии с личностью типа «А», «Б» или «Д» не найдено [8]. Величину реактивной (РТ) и личностной (ЛТ) тревожности определяли по [12]. Различия между РТ и ЛТ были недостоверны. К НТ отнесены ИТР, набравшие 32,0 ± 0,6 балла, к ВТ – от 42,8 ± 0,4 балла и выше. Наличие депрессии определяли по методике [2], где состояние без депрессии определяли при 20–50 баллах; от 51 до 59 – легкая степень депрессии. Последняя отмечена только у ВТ/Ф и ВТ/М. По заключению психоневрологов, ВТ-пациенты в стационарном лечении не нуждались. ВТ/Х и ВТ/С назначали анксиолитик (Ах), а ВТ/Ф и ВТ/М – антидепрессант (Ад). Из Ах в 96 % назначали сибазон по 2,5 мг утром и на ночь. Из Ад в 96 % назначали коаксил по 12,5 мг утром и на ночь (в 4 % – золофт, по 25 мг/сут.). Назначение Ах и Ад водителям и НТ-лицам не показано [9]. Значения исходного вегетативного тонуса свидетельствовали о том, что у Х и С достоверно превалировал SNS, а у Ф и М – парасимпатический (PSNS) отдел ВНС. Всем обследуемым проводилась эхокардиография (ЭхоКГ) на аппарате «Siemens Sonoline G 50» с использованием мультичастотного секторного датчика Р4-2. При этом в В-режиме определяли конечные диастолический (КДО, мл) и систолический (КСО, мл) объемы, фракцию выброса (ФВ, %) ЛЖ, ударный (УОК, мл) и минутный (МОК, л) объемы кровотока. В М-режиме измеряли конечный диастолический (КДР) и систолический (КСР) размеры, диастолическую и систолическую толщину задней стенки ЛЖ (ТЗСЛЖ). Массу миокарда ЛЖ (г) вычисляли на основании его длины и толщины по короткой оси из парастернального доступа по формуле: 1,04 × [(ТМЖП + ТЗСЛЖ + КДР)^3 – КДР^3] – 13,6 (г), где ТМЖП – толщина межжелудочковой перегородки (МЖП); индекс ММЛЖ (ИММЛЖ, г/м^2) рассчитывали по отношению ММЛЖ к площади тела (м^2) [11]. За нормальные значения ММЛЖ и ИММЛЖ у мужчин принято: менее 180 г и 134 г/м^2 соответственно [5]. Для оценки сократительной функции ЛЖ использовалась величина ФВ и фракция укорочения (ФУ, %) ЛЖ. Величина соотношения ТМЖП/ТЗСЛЖ оказалась менее 1,5, что говорит об отсутствии асимметричной гипертрофии МЖП [11]. При ЭхоКГ оценка диастолической дисфункции ЛЖ смещается с характера трансмитрального кровотока на оценку давления наполнения ЛЖ. При этом характеристика диастолической функции (ДФ) ЛЖ должна начинаться с оценки основной – систолической – функции ЛЖ [2]. Из параметров, характеризующих диастолическую функцию сердца, оценивалась максимальная скорость трансмитрального кровотока – пик Е (Е, см/с) и скорость кровотока в систолу предсердий – пик А (А, см/с), а также коэффициент соотношения Е/А (усл. ед.). Признаком снижения ДФ считают снижение коэффициента Е/А менее 1 в сочетании с оценкой систолической функции [1]. Из нарушений ДФ учитывали только первый тип.

Обоснование вариантов АГТ

С 2004 по 2012 год назначение АГТ проводилось в рамках 6 групп препаратов, согласно Приказу Минздравсоцразвития РФ от 22.11.2004 № 254 «Об утверждении стандарта медицинской помощи больным артериальной гипертонией». В начале исследования (1999–2004 годы) назначение препаратов АГТ было эмпирическим.

Однако анализ эффективности АГТ показал, что число случаев осложнений в группах с активностью SNS-отдела у ВТ/Х и ВТ/С, получавших БАБ, и ВТ/Ф и ВТ/МС с активностью РААС и PSNS-отдела ВНС, получавших иАПФ, оказалось ниже, чем в группах сравнения, получавших «эмпирическую» АГТ, при которой дозы те же, но Х и С принимали иАПФ + диуретик (Д), а Ф и М – БАБ + Д. В этой связи в основной группе ВТ/Х- и ВТ/С-пациенты ввиду SNS-тонии получали БАБ, в 96 % – метопролол (ВТ/Х и ВТ/С по 200 мг/сут. (4 % – его аналоги), а НТ/Х и НТ/С – по 100 мг/сут.) и Д (гидрохлоротиазид): ВТ/Х и ВТ/С по 25 мг/сут., а НТ – по 12,5 мг/сут. У ВТ (НТ)/Ф и ВТ (НТ)/М содержание альдостерона было выше, а содержание кортизола – ниже, чем у ВТ (НТ)/Х и ВТ (НТ)/С, что расценено как превалирование РААС у Ф и М по сравнению с Х и С, а активность ГГНС (кортизол) у Х и С выше, чем у Ф и М. Это объясняет, почему ВТ/Ф- и ВТ/М-пациенты на фоне PSNS-тонии и активности РААС (по альдостерону) получали иАПФ, в 96 % – эналаприл по 20 мг/сут. (4 % – его аналоги) + верошпирон по 100–200 мг/сут. (в 75 %), реже (25 %) – гидрохлоротиазид по 25 мг/сут., поскольку содержание калия в крови у них было более низким, чем у Х и С. НТ/Ф и НТ/М назначался эналаприл по 10 мг/сут. + гидрохлоротиазид (гипотиазид) по 12,5 мг/сут. Все пациенты получали панангин по 2 таб./сут. и кардиомагнил по 1 таб./сут. Эффективность АГТ, основанной на целенаправленном купировании психосоматических особенностей пациента, и вариант эмпирической АГТ оценивали по выраженности ремоделирования гипертрофии ЛЖ (ГЛЖ). Полученные результаты учитывали через 3, 6, 9, 12, 18 месяцев АГТ и обрабатывали методами вариационной статистики (M ± m) с использованием стандартного пакета программ «Statistica 6.0» и t-критерия Стьюдента. Статистически значимыми считали значения $p < 0,05$. В рамках статьи представлены данные до лечения, а также через 12 и 18 месяцев АГТ. Исследование выполнено с соблюдением положений Хельсинкской декларации по лечению и обследованию людей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подобные исследования ранее не проводились, и нами впервые было установлено, что у обследованных лиц ММЛЖ и ИММЛЖ достоверно снижались в том же «темпераментальном» ряду, что и снижение содержания альдостерона и инсулина: M > Ф > С > Х. При этом у ВТ(НТ)-больных ММЛЖ и ИММЛЖ были достоверно выше, чем у здоровых ВТ(НТ)-лиц соответствующего темперамента, а у ВТ – выше, чем у НТ-лиц соответствующего темперамента (табл. 1). То есть величина ГЛЖ тесно связана с повышением симпатических влияний (у Х и С), особенно на фоне PSNS-тонии в сочетании с повышением активности РААС (у Ф и М). При этом у ВТ-пациентов ГЛЖ оказалась выше, чем у НТ. Можно предположить, что в развитии заболевания и дебюте АГ у Х и С имела место преимущественная активация SNS-отдела ВНС, в меньшей степени – РААС, а у Ф и М на фоне изменения тонуса PSNS превалировала активность РААС. Отрицательная сторона последнего события (по степени влияния на ММЛЖ и ИММЛЖ) особенно заметна у ВТ/Ф и ВТ/М, а также у ВТ по сравнению с НТ-лицами соответствующего темперамента (табл. 1–3). Следовательно, в лечении необходим учет и купирование психо-

Таблица 1

ММЛЖ (г) у больных АГ-II мужчин до (0), через 12 и 18 месяцев АГТ без учета (1; 2) и с учетом (1а; 2а) психосоматических особенностей пациента за период исследования с 1999 по 2012 год

Темперамент / группы			Высокотревожные: 0	12 мес.	18 мес.	здоровые		Низкотревожные: 0	12 мес.	18 мес.	здоровые
ММЛЖ, г	Х	1 (50)	372,1 ± 2,0	351,3 ± 1,8	335,2 ± 1,8	131,4 ± 1,5**	2 (50)	341,9 ± 1,2	322,3 ± 1,6	297,3 ±1,4	114,8 ± 1,6** (52)
		1а (50)	372,2 ± 2,4	336,2 ± 1,8**	261,4 ± 1,3**		2а (50)	342,1 ± 1,4	316,3 ± 1,5**	225,5 ± 1,6**	
	С	1 (52)	382,6 ± 2,2	366,8 ± 1,5	325,0 ± 1,8	133,3 ± 1,6**	2 (51)	368,4 ± 1,8	345,0 ± 1,5	320,0 ± 1,7	123,5 ± 1,5** (53)
		1а (53)	382,8 ± 2,5	358,2 ± 1,6**	291,0 ± 1,5**		2а (52)	368,9 ± 1,9	337,0 ± 1,6**	248,7 ± 1,4**	
	Ф	1 (54)	426,0 ± 2,1	409,4 ± 1,8	372,5 ± 1,6	134,8 ± 1,5** (62)	2 (52)	383,8 ± 1,9	363,4 ± 1,9	343,8 ± 1,6	128,7 ± 1,4** (58)
		1а (56)	426,4 ± 2,5	364,4 ± 1,5**	332,6 ± 1,7**		2а (54)	384,3 ± 2,1	335,3 ± 1,6**	258,7 ± 1,8**	
	М	1 (50)	434,9 ± 2,0	419,9 ± 1,8	389,4 ± 1,9	135,7 ± 1,4** (54)	2 (50)	398,6 ± 2,0	378,5 ± 1,6	354,8 ± 1,6	130,8 ± 1,5** (52)
		1а (50)	435,0 ± 2,4	381,6 ± 1,6**	363,4 ± 2,0**		2а (50)	399,4 ± 2,2	360,8 ± 1,5**	279,6 ± 1,6**	

Примечание. Здесь и далее в скобках указано число обследованных; ** – различия по ММЛЖ (ИММЛЖ) между 1 и 1а (2 и 2а) до лечения (0) при $p > 0,05$; различия между 1 и 1а, 2 и 2а в ходе лечения, а также между ними и здоровыми при $p < 0,05$.

Таблица 2

ИММЛЖ (г/м^2) у больных АГ-II мужчин до (0), через 12 и 18 месяцев АГТ без учета (1; 2) и с учетом (1а; 2а) психосоматических особенностей пациента за период исследования с 1999 по 2012 год

Темперамент / группы			Высокотревожные					Низкотревожные			
			0	12 мес.	18 мес.	здоровые		0	12 мес.	18 мес.	здоровые
ММЛЖ, г	Х	1 (50)	188,8 ± 1,6	177,6 ± 0,8	170,4 ± 0,8	66,2 ± 0,6**	2 (50)	171,0 ± 1,6	160,6 ± 0,8	147,8 ± 1,1	57,3 ± 0,4**
		1а (50)	188,9 ± 1,9	169,7 ± 0,8**	132,0 ± 0,8**		2а (50)	171,3 ± 1,9	158,0 ± 0,9**	112,5 ± 1,2**	
	С	1 (52)	192,0 ± 1,7	182,5 ± 0,9	160,9 ± 0,8	66,8 ± 0,7**	2 (51)	180,5 ± 1,7	167,4 ± 0,9	155,4 ± 0,9	59,7 ± 0,5**
		1а (53)	192,1 ± 1,9	178,1 ± 0,9**	144,8 ± 0,9**		2а (52)	181,2 ± 2,0	163,2 ± 0,9**	120,6 ± 0,9**	
	Ф	1 (54)	213,4 ± 1,6	203,7 ± 0,8	185,3 ± 0,9	67,4 ± 0,7**	2 (52)	186,5 ± 1,6	175,9 ± 0,9	166,9 ± 0,8	62,5 ± 0,6**
		1а (56)	213,6 ± 1,8	181,2 ± 0,7**	165,0 ± 0,9**		2а (54)	186,7 ± 1,9	161,8 ± 0,8**	126,2 ± 0,8**	
	М	1 (50)	218,5 ± 1,7	210,4 ± 0,6	194,7 ± 1,2	67,8 ± 0,8**	2 (50)	197,3 ± 1,2	189,3 ± 1,1	177,6 ± 1,2	65,4 ± 0,7**
		1а (50)	218,8 ± 2,0	190,4 ± 0,7**	181,7 ± 1,1**		2а (50)	198,4 ± 1,8	180,2 ± 0,9**	138,6 ± 1,1**	

Таблица 3

Величина фракции выброса (%) и фракции укорочения (%) у больных АГ-II мужчин до (0), через 12 и 18 месяцев АГТ без учета (1; 2) и с учетом (1а; 2а) психосоматических особенностей пациента за период исследования с 1999 по 2012 год

Темперамент / группы		Высокотревожные					
		Фракция выброса, %			Фракция укорочения, %		
		0	18 мес.	здоровые	0	18 мес.	здоровые
Х	1 (50)	57,6 ± 0,1	61,5 ± 0,4	74,6 ± 0,2** (56)	30,6 ± 0,1	33,3 ± 0,4	43,0 ± 0,2**
	1а (50)	57,4 ± 0,3	66,0 ± 0,4**		30,8 ± 0,2	37,0 ± 0,3**	
С	1 (52)	55,8 ± 0,1	60,3 ± 0,4	73,9 ± 0,2** (60)	30,6 ± 0,1	32,3 ± 0,4	42,6 ± 0,2**
	1а (53)	55,9 ± 0,2	65,2 ± 0,3**		30,8 ± 0,4	36,1 ± 0,3**	
Ф	1 (54)	54,6 ± 0,1	58,7 ± 0,4	73,5 ± 0,2** (62)	28,7 ± 0,1	31,4 ± 0,5	42,3 ± 0,3**
	1а (56)	54,8 ± 0,3	63,6 ± 0,3**		28,9 ± 0,3	34,9 ± 0,3**	
М	1 (50)	53,6 ± 0,1	57,6 ± 0,4	73,0 ± 0,3**	27,7 ± 0,1	30,7 ± 0,5	41,9 ± 0,2**
	1а (50)	53,8 ± 0,3	62,7 ± 0,3**		27,9 ± 0,2	34,4 ± 0,4**	

Темперамент / группы		Низкотревожные					
		Фракция выброса, %			Фракция укорочения, %		
		0	18 мес.	здоровые	0	18 мес.	здоровые
Х	2 (50)	61,2 ± 0,1	63,8 ± 0,9	84,7 ± 0,3**(52)	33,1 ± 0,5	35,0 ± 0,3	46,6 ± 0,2**
	2а (50)	61,4 ± 0,3	69,5 ± 0,8**		33,4 ± 0,7	39,4 ± 0,3**	
С	2 (51)	59,2 ± 0,1	61,9 ± 0,6	76,4 ± 0,3**(53)	31,7 ± 0,5	33,7 ± 0,3	44,6 ± 0,2**
	2а (52)	59,3 ± 0,3	68,3 ± 0,7**		31,9 ± 0,6	38,3 ± 0,4**	
Ф	2 (52)	57,4 ± 0,1	59,8 ± 0,5	74,9 ± 0,3**(58)	30,5 ± 0,3	32,2 ± 0,3	43,6 ± 0,3**
	2а (54)	57,6 ± 0,4	67,7 ± 0,6**		30,7 ± 0,5	41,0 ± 0,4**	
М	2 (50)	55,6 ± 0,1	58,7 ± 0,4	74,2 ± 0,2**(52)	28,9 ± 0,6	32,1 ± 0,3	43,1 ± 0,3**
	2а (50)	55,8 ± 0,3	62,4 ± 0,4**		29,2 ± 0,7	37,0 ± 0,4**	

соматических особенностей темперамента: тревожности, депрессивности, равновесности отделов ВНС, активности ГГНС (кортизол) и РААС (альдостерон) как показателей, тесно связанных с выраженностью ГЛЖ.

Исследование показало, что значения ФВ, ФУ и коэффициента Е/А достоверно снижались в том же ряду, что и ММЛЖ: М > Ф > С > Х. У ВТ(НТ)-больных значения ФВ, ФУ и Е/А были ниже (хуже), чем у ВТ(НТ)-здоровых, а у ВТ-пациентов – ниже, чем у НТ-лиц соответствующего темперамента (табл. 3, 4). Иначе говоря, значения показателей сократительной функции (СФ) сердца у пациентов оказались ниже, чем

Таблица 4

Величина коэффициента соотношения E/A (усл. ед.) у больных АГ-II мужчин до (0), через 12 и 18 месяцев АГТ без учета (1; 2) и с учетом (1а; 2а) психосоматических особенностей пациента за период исследования с 1999 по 2012 год

Темперамент / группы			Высокотревожные					Низкотревожные			
			0	12 мес.	18 мес.	здоровые		0	12 мес.	18 мес.	здоровые
ММЛЖ, г	Х	1 (50)	0,7 ± 0,03	0,761 ± 0,03	0,902 ± 0,02	1,32 ± 0,04**(56)	2 (50)	0,91 ± 0,03	0,94 ± 0,03	1,08± 0,04	1,48 ± 0,04**(50)*
		1а (50)	0,696 ± 0,05	0,962 ± 0,03**	1,04 ± 0,04**		2а (50)	0,92 ± 0,04	1,04 ± 0,04**	1,24±0,06**	
	С	1 (52)	0,64 ± 0,03	0,74 ± 0,03	0,8 ± 0,04	1,22 ± 0,03**(60)	2 (51)	0,80 ± 0,03	0,89 ± 0,03	0,98± 0,05	1,38 ± 0,03**(53)
		1а (53)	0,639±0,04	0,887 ± 0,03**	0,987 ± 0,05**		2а (52)	0,81 ± 0,04	0,99 ± 0,04**	1,19±0,06**	
	Ф	1 (54)	0,573 ± 0,02	0,666 ± 0,03	0,74 ± 0,06	1,12 ± 0,04**(62)	2 (52)	0,7 ± 0,03	0,8 ± 0,03	0,9 ± 0,04	1,28 ± 0,03**(58)
		1а (56)	0,576 ± 0,04	0,8 ± 0,03**	0,896 ± 0,05**		2а (54)	0,69 ± 0,04	0,9 ± 0,04**	1,04 ± 0,05**	
	М	1 (50)	0,573 ± 0,02	0,646 ± 0,03	0,678 ± 0,04	1,03 ± 0,03**(54)	2 (50)	0,6 ± 0,03	0,7 ± 0,04	0,82 ± 0,04	1,19 ± 0,04**52)
		1а (50)	0,578 ± 0,05	0,724 ± 0,03**	0,81 ± 0,03**		2а (50)	0,61 ± 0,05	0,82 ± 0,03**	0,94 ± 0,03**	

у здоровых, а у ВТ-больных – ниже, чем у НТ-пациентов. Можно предположить, что тенденция к снижению ДФ (но не дисфункции) у трудоспособных и работающих ВТ-пациентов была выше, чем у НТ. С учетом темпераментальных характеристик у ВТ/Ф и ВТ/М тенденция к снижению СФ и ДФ самая высокая по сравнению с остальными обследованными. Длительный прием препаратов АГТ сочетался с увеличением значений ФВ, ФУ и коэффициента E/A. Однако АГТ, основанная на блокаде активности SNS у Х и С и РААС (по альдостерону) у Ф и М, сочеталась с более ранним (на 6 месяцев) и более выраженным изменением значений изучаемых показателей. При этом через 18 месяцев лечения значения ММЛЖ, ИММЛЖ, ФВ, ФУ и E/A были значительно ближе к таковым у здоровых лиц соответствующей тревожности и темперамента (табл. 1–4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Парасимпатикотония на фоне превалирования уровня альдостерона и инсулина у Ф и М по сравнению с Х и С сочеталась с выраженной ГЛЖ и более низкими значениями показателей систолической функции сердца (по ФВ, ФУ).

2. В отличие от эмпирической АГТ, лечение, направленное на снижение симпатикотонии у Х и С и активности РААС (по альдостерону) у Ф- и М-пациентов, сочеталось с выраженным и на 6 месяцев более ранним приближением ММЛЖ и систолической функции сердца (по ФВ и ФУ) к таковым у здоровых лиц соответствующего темперамента и тревожности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехин М. Н., Сидоренко Б. А. Современные подходы к эхокардиографической оценке диастолической функции левого желудочка сердца // Кардиология. 2011. № 1. С. 72–77.
2. Ахметжанов Э. Р. Шкала депрессии. Психологические тесты. М.: Лист, 1996. 320 с.
3. Кобалава Ж. Д., Котовская Ю. В. Достижения и проблемы современных исследований антигипертензивных препаратов // Кардиология. 2011. № 1. С. 91–100.
4. Ощепкова Е. В. Смертность населения от сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации в 2001–2006 гг. и пути по ее снижению // Кардиология. 2009. № 2. С. 67–73.
5. Профилактика, диагностика и лечение АГ. Российские рекомендации (3-й пересмотр) // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2008. № 7. Прилож. 2. С. 5–16.
6. Соколов Е. И., Лавренова Н. Ю., Голобородова И. В. Реакция симпатико-адреналовой системы у больных ишемической болезнью сердца при эмоциональном напряжении в зависимости от типа личности // Кардиология. 2009. № 12. С. 18–23.
7. Столяренко Л. Д. Опросник Айзенка по определению темперамента. Основы психологии. Ростов н/Д: Феникс, 1997. 736 с.
8. Сумин А. Н. Поведенческий тип «Д» (дистрессорный) при сердечно-сосудистых заболеваниях // Кардиология. 2010. № 10. С. 66–73.
9. Усенко А. Г. Особенности психосоматического статуса у больных артериальной гипертензией, профилактика осложнений и оптимизация лечения: Автореф. дис. … канд. мед. наук. Новосибирск, 2007. 29 с.
10. Усенко Г. А., Усенко А. Г., Васендин Д. В., Машков С. В. Влияние содержания кортизола и альдостерона на время свертывания крови у больных гипертонической болезнью // Ученые записки Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова. 2012. Т. XIX. № 3. С. 58–62.
11. Фейгенбаум Х. Эхокардиография. М.: Видар, 1999. 512 с.

12. Х а н и н Ю. Л. Исследование тревоги в спорте // Вопросы психологии. 1978. № 6. С. 94–106.
13. Ч а з о в Е. И. Перспективы кардиологии в свете прогресса фундаментальной науки // Терапевтический архив. 2009. № 9. С. 5–9.

Usenko G. A., Novosibirsk State Medical University (Novosibirsk, Russian Federation)
Usenko A. G., Novosibirsk Regional Hospital № 2 of War Veterans (Novosibirsk, Russian Federation)
Vasendin D. V., Siberian State Geodetic Academy (Novosibirsk, Russian Federation)
Ivanov S. V., State Novosibirsk Regional Clinical Hospital (Novosibirsk, Russian Federation)
Velichko N. P., Children's City Polyclinic № 1 (Novosibirsk, Russian Federation)
Nishcheta O. V., Outpatient Department (settlement Kudryashi, Novosibirsk district, Novosibirsk region, Russian Federation)
Kozyreva T. Yu., State Novosibirsk Regional Clinical Hospital (Novosibirsk, Russian Federation)

SUCCESSFUL MASS REDUCTION OF LEFT VENTRICLAR MYOCARD IN PATIENTS WITH DIFFERENT TEMPERAMENT AND ANXIETY LEVEL

The purpose of the study was to estimate effectiveness of the purposeful antihypertension treatment (D-AHT) based and not based (NB-AHT) on correction of sympathetic activity in patients with choleric (Ch) and sanguine (Sg) temperaments, and activity of rennin-angiotensin-aldosterone system (RAAS) in phlegmatic (Ph) and melancholic (M) patients on the example of lowering mass of the left ventricular myocard (MMLV) and MMLV index. We studied males (avarage age 54,2±1,8): 447 healthy and 824 patients who suffered from AH-II (mean duration 11,6±1,4) with prevalence of Ch, Sg, Ph, and M temperaments, with high (HA) and low (LA) levels of anxiety. Depression of light degree was diagnosed only in HA|PH and HA/M. During 18 months persons of the main group, Ch and Sg, received β-adrenoblockers (β-AB) + diuretic(D) + anxiolitic (sibazon) and Ph and M – inhibitors of angiotensinconvertive factors (I-ACF) + D + antidepressant (coaxil) (variations of D-AHT). Persons in the control group received similar preparations and doses, but HA(LA)Ch and Sag – I-ACF, but Ph and M – β-AB. In comparison to NB-ABN, B-AHT corresponded with earlier (6 months) and more expressive data of MMLV, IMMLV, with systolic and diastolic functions in healthy persons of equal temperament and anxiety.

Key words: hypertension, psychosomatic status, remodelling myocardial hypertrophy

REFERENCES

1. A l e k h i n M. N., S i d o r e n k o B. A. Modern approaches to echocardiographic evaluation of diastolic function of the left ventricle of the heart [Sovremennye podkhody k ekhokardiograficheskoy otsenke diastolicheskoy funktsii levogo zheludochka serdtsa]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2011. № 1. P. 72–77.
2. A k h m e t z h a n o v E. R. *Shkala depressii. Psihologicheskie testy* [Depression Scale. Psychological tests]. Moscow, List Publ., 1996. 320 p.
3. K o b a l a v a Zh. D., K o t o v s k a y a Yu. V. Achievements and challenges of modern research antihypertensive medications [Dostizheniya i problemy sovremennykh issledovaniy antigipertenzivnykh preparatov]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2011. № 1. P. 91–100.
4. O s h c h e p k o v a E. V. Mortality from cardiovascular diseases in Russian Federation in 2001–2006 and ways to reduce it [Smertnost' naseleniya ot serdechno-sosudistykh zabolevaniy v Rossiyskoy Federatsii v 2001–2006 gg. i puti po ee snizheniyu]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2009. № 2. P. 67–73.
5. Prevention, diagnosis, and treatment of hypertension. Russian recommendation (3rd revision) [Profilaktika, diagnostika i lechenie AG. Rossiiskye rekomendatsii (3-y peresmotr)]. *Kardiovaskulyarnaja terapiya i profilaktika* [Cardiovascular therapy and prevention]. 2008. № 7. App. 2. P. 67–73.
6. S o k o l o v E. I., L a v r e n o v a N. Yu., G o l o b o r o d o v a I. V. The reaction of sympathetic-adrenal system in patients with coronary heart disease under emotional stress, depending on the type of personality [Reaktsiya simpatiko-adrenalovoy sistemy u bol'nykh ishemicheskoy bolezn'yu serdtsa pri emotsional'nom napryazhenii v zavisimosti ot tipa lichnosti]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2009. № 12. P. 18–23.
7. S t o l y a r e n k o L. D. *Oprosnik Ayzenka po opredeleniyu temperamenta. Osnovy psikhologii* [Eysenck questionnaire to determine persons's temperament. Principles of Psychology]. Rostov n/D, Feniks Publ., 1997. 736 p.
8. S u m i n A. N. Behavioral type "D" (distress norm) in cardiovascular diseases [Povedencheskiy tip "D" (distressornyi) pri serdechno-sosudistykh zabolevaniyakh]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2010. № 10. P. 66–73.
9. U s e n k o A. G. *Osobennosti psihosomaticheskogo statusa u bol'nykh arterial'noy gipertenziey, profilaktika oslozhneniy i optimizatsiya lecheniya. Dis. kand. med. nauk* [Features of psychosomatic patients with arterial hypertension, prevention of complications and treatment optimization. Cand. med. sci. diss.]. Novosibirsk, 2007. 29 p.
10. U s e n k o G. A., U s e n k o A. G., V a s e n d i n D. V., M a s h k o v S. V. Blood coagulation time dependence on the content of cortisol and aldosteron in hypertension patients [Vliyanie soderzhaniya kortizola i al'dosterona na vremya svertyvaniya krovi u bol'nykh gipertonicheskoy bolezn'yu]. Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta im. akad. I. P. Pavlova [Proceedings of St. Petersburg State Medical University. Acad. I. P. Pavlov]. 2012. Vol. XIX. № 3. P. 58–62.
11. F e y g e n b a u m H. Ehokardiografiya [Echocardiography]. Moscow, Vidar Publ., 1999. 512 p.
12. H a n i n Ju. L. The study of anxiety in sport [Issledovanie trevogi v sporte]. *Voprosy psikhologii* [Questions of psychology]. 1978. № 6. P. 94–106.
13. C h a z o v E. I. Prospects of cardiology in light of the progress of basic science [Perspektivy kardiologii v svete progressa fundamental'noy nauki]. *Terapevticheskiy arkhiv* [Therapeutic Archives]. 2009. № 9. P. 5–9.

Поступила в редакцию 12.02.2013

Июнь, № 4 **Медицинские науки** **2013**

УДК 616.142

ЭРНЕСТ АНАТОЛЬЕВИЧ ЩЕГЛОВ
кандидат медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург хирургического отделения № 1, Больница скорой медицинской помощи (Петрозаводск, Российская Федерация)
esheglov@onego.ru

НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА
доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vezikov23@mail.ru

ИВАН ПЕТРОВИЧ ДУДАНОВ
доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАМН, заведующий кафедрой факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
dudanov@karelia.ru

НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА АЛОНЦЕВА
кандидат медицинских наук, заведующий хирургическим отделением № 1, Больница скорой медицинской помощи (Петрозаводск, Российская Федерация)
alontseva1967@mail.ru

АЛЕКСАНДР ТИМОФЕЕВИЧ БАЛАШОВ
доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии, онкологии, урологии и фтизиатрии, декан медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
balashov@psu.karelia.ru

РОЛЬ НАРУШЕНИЙ ВЕНОЗНОГО ОТТОКА В РАЗВИТИИ ОСТЕОАРТРОЗА КОЛЕННЫХ СУСТАВОВ (обзор литературы)*

Статья посвящена проблеме сочетанной патологии – варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов. Дан обзор современной российской и зарубежной литературы, посвященной этой проблеме. В данных публикациях анализируется, каким образом нарушения венозного оттока приводят к развитию остеоартроза коленных суставов, как наличие варикозной болезни усугубляет клиническую картину гонартроза, усиливает и модифицирует болевой синдром, характерный для данного заболевания.

Ключевые слова: хроническая венозная недостаточность, варикозная болезнь, остеоартроз коленных суставов

На долю остеоартроза приходится от 60 до 80 % всех заболеваний костно-мышечной системы [4], [13], [25]. Клинические симптомы этой патологии наблюдаются более чем у 10–20 % населения, а рентгенологические – значительно чаще [4], [16]. С 2000 по 2005 год заболеваемость остеоартрозом выросла на 58 % и к настоящему моменту является самой распространенной патологией суставов [5]. Нетрудоспособность вследствие заболевания остеоартрозом уступает только нетрудоспособности при ишемической болезни сердца [16]. Остеоартроз коленного сустава приводит к снижению трудоспособности и инвалидизации пациентов в 10–21 % случаев [15].

Не менее велика и распространенность варикозной болезни нижних конечностей. В структуре общей заболеваемости варикозная болезнь составляет около 5 %, а среди поражений периферических сосудов – 10–40 % и является самой распространенной патологией периферических сосудов [1], [14], [21]. В США и Западной Европе варикозная болезнь встречается у 25 % населения. В России варикозной болезнью страдают более 30 млн человек [21]. В последнее время многие эпидемиологические обзоры указывают на то, что поражение поверхностной венозной системы встречается у 30–62 % мужчин и женщин [10], [32], [34], [36]. По самым пессимистичным данным, частота варикозной болезни у взрослых достигает 86 % [3]. До 25–33 % женщин и 10–20 % мужчин имеют формы болезни, требующие специализированного лечения [22]. Субъективные жалобы, связанные с хронической венозной недостаточностью, встречаются у 29–61 % людей [28].

Вследствие такой распространенности данных форм патологии особый интерес вызывают вопросы взаимосвязи между ними, а также роль, которую играют нарушения венозного оттока в формировании остеоартроза коленных суставов и роль ограничения подвижности суставов в развитии варикозной болезни.

К настоящему моменту этиология остеоартроза в целом и гонартроза в частности остается до конца не изученной [4]. По данным О. Г. Козловой [13], у остеоартроза и варикозной болезни присутствует некоторая общность этиопатогенеза. Для них важны такие факторы, как генетическая предрасположенность, наличие соединительнотканной дисплазии, ожирение, женский пол [29], [35]. Не отвергая роль остальных факторов, мы остановимся в своем обзоре только на моментах, указывающих на взаимосвязь данной патологии с варикозной болезнью. К тому же до сих пор до конца не ясно, есть ли между гонартрозом и варикозной болезнью нижних конечностей синергизм или хроническая венозная недостаточность ухудшает течение гонартроза [13], [18].

В последнее время при анализе этиопатогенеза остеоартроза коленного сустава все большее внимание уделяется внесуставным компонентам, особенно сосудистой составляющей развития гонартроза. Это привело к созданию концепции венозного стаза в патогенезе гонартроза [37], в соответствии с которой венозный стаз любой этиологии ведет к переполнению кровью и повышению нагрузки на оставшиеся функционирующие сосуды. Эти сосуды расширяются с целью адаптации к увеличивающемуся сосудистому сопротивлению, что приводит к увеличению внутрисосудистого давления. Увеличившееся внутрисосудистое давление, в свою очередь, приводит к повышению фильтрации через стенку сосуда и повышению давления в окружающей костной ткани из-за относительной твердости кости.

Нарушение оттока уменьшает межуточный поток жидкости, снижает транспорт в клетку питательных веществ и кислорода, удаление продуктов жизнедеятельности клетки, что негативно влияет на остеоциты. Блок поступления питательных веществ в остеоцит приводит к его гибели через 4 часа, а ишемия кости в течение 6 часов вызывает существенный остеонекроз [13].

А. А. Позин приводит данные о том, что у пациентов с остеоартрозом коленных суставов выявляется существенное повышение венозного давления. Результаты его исследований показывают вероятность влияния венулярно-венозных нарушений на развитие остеоартроза. Исследователь выявил связь между повышением венозного давления на одной из заднебольшеберцовых вен с наличием синовита коленного сустава и характерных ночных болей [19].

Нарушение венозного тонуса и венозного оттока является одной из причин нарушения кровоснабжения коленного сустава и может оказывать влияние на течение суставного синдрома при гонартрозе [19], [24], [31]. В ходе исследований обнаружено наличие венозного стаза и нарушений венозного оттока в субхондральной кости у пациентов с остеоартрозом коленных суставов [7]. Выявляется прямо пропорциональная связь между нарушениями венозного оттока и стадией остеоартроза коленного сустава [6].

Длительно существующее повышение венозного давления может, в свою очередь, приводить к открытию артериовенозных анастомозов, ухудшению тканевой микроциркуляции, тканевой гипоксии, замедлению эвакуации продуктов обмена. Все это усугубляет нарушение питания хрящевой ткани [31].

Э. Р. Агабабова считает венозный стаз основным видом нарушения кровоснабжения сустава, причем он может возникать как из-за деформации подхрящевой кости, так и из-за нарушений кровообращения в конечностях, связанных с проявлениями хронической венозной недостаточности вследствие перенесенного тромбофлебита и варикозной болезни нижних конечностей [2].

Существует точка зрения, что остеоартроз коленных суставов с самого начала представляет собой именно гиперваскулярный процесс в субхондральной кости. Одним же из ведущих звеньев патогенеза остеоартроза является повышение внутрикостного давления, которое определяет трофику костной ткани и зависит от степени венозного застоя. В доказательство этого приводятся данные патоморфологических исследований, показывающих, что вследствие венозной гипертензии вены периартикулярных тканей при остеоартрозе коленного сустава характеризуются увеличенным калибром, повышением числа анастомозов [26].

Главными клиническими симптомами остеоартроза являются боль и ограничение функции сустава. Однако механизм возникновения боли при остеоартрозе остается до конца не изученным. Одной из возможных причин называют возникновение костного венозного стаза и внутримедуллярной гипертензии [20]. Отмечена важная роль повышенного внутрикостного давления в возникновении ночных болей [7]. Выявлена прямо пропорциональная зависимость венозного оттока от стадии артроза [7].

Выявлена связь между повышенным венозным давлением и связанными с этим нарушениями микроциркуляции и прогрессированием гонартроза. Кроме того, обнаружено, что нарушение венозного оттока связано с локальной воспалительной активностью и интенсивностью болевого синдрома [19].

Нарушение периферического кровообращения усиливает болевой синдром, способствует развитию и поддержанию синовита, что, в свою очередь, предрасполагает к увеличению венозного застоя и усугублению венозной патологии, замыкая порочный круг [23].

Присоединение нарушений венозного оттока вследствие хронической венозной недостаточности у пациентов с остеоартрозом коленных суставов приводит к утяжелению проявлений суставного синдрома. У пациентов с сочетанной патологией увеличивается интенсивность болей в суставах в покое и при движении, повышается индекс мышечного синдрома, который характеризует количество и болезненность участков мышечного уплотнения и состоит из суммы баллов: выраженность спонтанных болей, тонус мышц, гипотрофия мышц, количество узелков миофиброза, болезненность мышц при пальпации, ее продолжительность, степень иррадиации. У таких пациентов чаще встречаются синовиты. У них же отмечается достоверное снижение функциональной активности по данным индекса Lequesne и WOMAC [24].

С. М. Носков и соавторы выявили, что венозная гипертензия модулирует суставной синдром у пациентов с гонартрозом. Авторы отмечают связь интенсивной ночной боли с более высоким постокклюзионным давлением в задней большеберцовой вене. Отмечены ассоциации постокклюзионного давления в этой вене с выраженностью вторичного синовита, толщиной хряща и синовиальной оболочки, объемом синовиальной жидкости, выраженностью ночной боли. Отмечена слабая корреляция с рентгенологической стадией гонартроза и стажем заболевания [17].

У пациентов с остеоартрозом коленных суставов в 66,3 % случаев выявляется венозная гипертензия в нижних конечностях. У таких пациентов отмечается более высокая интенсивность ночных болей и функциональная недостаточность. Выявлена достоверная корреляция уровня венозного давления с индексом массы тела, толщиной синовиальной оболочки и количеством синовиального выпота [13].

У больных остеоартрозом коленного сустава отмечается затруднение венозного оттока по данным реовазографии конечности. При 1-й и 2-й стадиях гонартроза в результате проводимого лечения отмечается улучшение показателей реовазографии, а выявление повышения периферического сопротивления и затруднение венозного оттока расценивается как отрицательная динамика процесса [8]. Изменение скорости кровотока по задней большеберцовой вене является диагностическим критерием, определяющим необходимость коррекции медикаментозной и функциональной терапии [9].

Т. В. Соколова отмечает повышенное венозное давление у пациентов с синовитом коленных суставов. Автор отмечает наличие прямой корреляции между повышением венозного давления и рентгенологической стадией остеоартроза, а такие признаки, как наличие остеосклероза, сужение суставной щели и деформация головки большеберцовой кости, особенно связаны с повышением венозного давления в нижних конечностях [27]. Однако, по данным Т. В. Соколовой, нет взаимосвязи между уровнем венозного давления и выраженностью болевого синдрома в коленных суставах, а также выраженностью венозного давления и толщиной хряща по данным артросонографии. Автор не выявляет достоверной корреляции между повышением венозного давления и длительностью заболевания гонартрозом.

Р. М. Нагибиным выявлено повышение венозного давления в задней большеберцовой вене у больных изолированным гонартрозом на 26,3 %, а при наличии сопутствующей варикозной болезни – на 68,4 % по сравнению со здоровыми лицами. У пациентов с гонартрозом в сочетании с варикозной болезнью нижних конечностей отмечено увеличение ночных болей, увеличение функциональной недостаточности нижних конечностей по индексу WOMAC и снижение работоспособности мышц – разгибателей колена. Выявлена положительная корреляция уровня венозного давления с выраженностью ночных болей, продолжительностью утренней скованности и индексом массы тела [16].

Причиной болевого синдрома при гонартрозе могут быть нарушения микроциркуляции, особенно при затруднении венозного кровотока в спонгиозной части кости [5]. Постоянные ноющие боли в покое связываются с внутрикостной гипертензией вследствие нарушения венозного дренажа [12]. В. А. Насонова также считает костный венозный стаз главной причиной появления болей при остеоартрозе. Она поставила повышение внутрикостного давления вследствие венозного застоя на первое место среди причин болей, впереди синовита, остеофитоза и др. [20].

В соответствии с рекомендациями Американского общества сосудистых хирургов у пациентов с варикозной болезнью часто встречаются ограничения подвижности коленных суставов [33].

Остеоартроз и варикозная болезнь имеют некоторую общность этиопатогенеза. Для них важны генетическая предрасположенность, наличие соединительнотканной дисплазии, ожирения, женский пол [29], [35]. Тем не менее пока не ясно, есть ли между гонартрозом и варикозной болезнью нижних конечностей синергизм или же хроническая венозная недостаточность ухудшает течение гонартроза [18]. Существует теория, что нарушение моторики при гонартрозе снижает эффективность мышечно-венозной помпы и усиливает явления хронической венозной недостаточности. Течение варикозной болезни у таких пациентов характеризуется выраженностью симптоматики, быстрым прогрессированием и осложненным течением. Проводимая коррекция функциональной недостаточности конечности приводит к улучшению результатов лечения флебологических пациентов [11]. Однако целый ряд исследований показывает, что именно хроническая венозная недостаточность приводит к нарушениям функции суставов нижних конечностей, например к ограничению их подвижности, а не наоборот [30].

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов М. Ю., Измайлов С. Г., Измайлов Г. А. и др. Хронические заболевания вен нижних конечностей. Н. Новгород: ФГУИ «Нижполиграф», 2002. 128 с.
2. Агабабова Э. Р. Принципы лечения остеоартроза // Клиническая ревматология. 1995. № 4. С. 3–6.
3. Бредихин Р. А. Ультразвуковое ангиосканирование в диагностике и выборе метода лечения варикозной болезни и ее рецидивов: Дис. … канд. мед. наук. Казань, 2002. 116 с.
4. Везикова Н. Н. Оценка эффективности болезнь-модифицирующих препаратов и локальных методов терапии при остеоартрозе коленных суставов: Дис. … д-ра мед. наук. Петрозаводск, 2005. 230 с.
5. Воробьев Д. В. Комплексное лечение гонартроза у пациентов пожилого и старческого возраста с применением способа ДЭНС-фореза: Дис. … канд. мед. наук. Самара, 2007. 124 с.
6. Гурьев В. Н. Синовиальный кровоток при артрозе // Труды 2-го всероссийского съезда травматологов-ортопедов. Л., 1973. С. 180–185.
7. Дахи А. Характеристика реактивного синовита при гонартрозе (клинико-инструментальное сопоставление): Автореф. дис. … канд. мед. наук. М., 1994. 24 с.
8. Долганова Т. И., Сазонова Н. В. Оценка периферической гемодинамики у больных с остеоартрозом коленного сустава II стадии // Фундаментальные исследования. 2009. № 4. С. 29–31.
9. Долганова Т. И., Чегуров О. К., Карасева Т. Ю., Карасев Е. А. Оценка периферической гемодинамики у больных с гонартрозом II–III стадии при лечении методикой корригирующей остеотомии в сочетании с артроскопией // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2011. Т. 10. № 3. С. 38–43.
10. Золотухин И. А. Скрининговое исследование ДЕВА-2: факторы риска и особенности течения хронических заболеваний вен у российских женщин // Флеболимфология. 2008. № 34. С. 11–14.
11. Каторкин С. Е., Сизоненко Я. В. Особенности диагностики и тактики лечения пациентов с хронической венозной недостаточностью и нарушениями опорно-двигательного аппарата / Материалы VIII научно-практической конференции Ассоциации флебологов России с международным участием // Флебология. 2010. Т. 4. № 2. С. 53–54.
12. Ковалев П. В. Методы реваскуляризации и декомпрессии субхондральной зоны в хирургическом лечении деформирующего гонартроза (клинико-экспериментальное исследование): Дис. … канд. мед. наук. Курск, 2002. 146 с.
13. Козлова О. Г. Локальная мышечная слабость и венозная гипертензия при гонартрозе: Дис. … канд. мед. наук. Ярославль, 2011. 113 с.
14. Константинова Г. Д., Зубарев А. Р., Градусов Е. Г. Флебология. М.: Видар-М, 2000. 160 с.
15. Матвеев Р. П., Брагина С. В. Социальная характеристика амбулаторных больных остеоартрозом коленного сустава // Экология человека. 2011. № 4. С. 50–55.
16. Нагибин Р. М. Особенности клиники и физической реабилитации у больных гонартрозом в сочетании с варикозной болезнью вен: Дис. … канд. мед. наук. Ярославль, 2011. 154 с.
17. Носков С. М., Козлова О. Г., Нагибин Р. М. и др. Нарушения венозного оттока в модуляции суставного синдрома у больных первичным гонартрозом // II Всероссийский конгресс ревматологов России: Тезисы. Ярославль, 2011. С. 55.
18. Носков С. М., Маргазин В. А., Шкребко А. Н. Реабилитация при заболеваниях сердца и суставов. М.: Гэотар-Медиа, 2009. 640 с.
19. Позин А. А. Значение периферического кровообращения в формировании структурных и функциональных нарушений коленных и тазобедренных суставов у больных ревматоидным артритом и остеоартрозом: Автореф. дис. … д-ра мед. наук. Ярославль, 2000. 43 с.
20. Ревматология. Национальное руководство / Под ред. Е. Л. Насонова, В. А. Насоновой. М.: Гэотар-Медиа, 2008. 714 с.
21. Савельев В. С., Гологорский В. А., Кириенко А. И. и др. Флебология: Руководство для врачей. М.: Медицина, 2001. 660 с.
22. Савельев В. С., Кириенко А. И., Богачев В. Ю. Хронические заболевания вен в Российской Федерации. Результаты международной исследовательской программы Vein Consult // Флебология. 2010. № 3. С. 9–12.
23. Салихов И. Г., Волкова Э. Р., Якупова С. П. Периартикулярное применение хондропротекторов у больных гонартрозом с признаками поражения сухожильно-связочного аппарата // Consilium Medicum. 2006. Т. 8. № 2. С. 18–23.
24. Салихов И. Г., Лапшина С. А., Мясоутова Л. И. и др. Остеоартроз и заболевания периферических вен нижних конечностей: особенности сочетанной патологии // Терапевтический архив. М., 2010. № 5. С. 58–60.
25. Светлова М. С., Везикова Н. Н. Клинико-инструментальная и лабораторная характеристика ранних стадий гонартроза // Терапевтический архив. 2010. № 5. С. 54–58.
26. Соков Л. П., Романов М. Ф. Деформирующие артрозы крупных суставов. М.: Изд-во УДН, 1991. 119 с.
27. Соколова Т. В. Роль гемодинамических факторов в формировании остеоартроза коленных и тазобедренных суставов: Дис. … канд. мед. наук, Ярославль, 1999. 114 с.
28. Шекоян А. О., Богачев В. Ю. Венозная боль: патофизиология и принципы лечения // Флеболимфология. 2010. № 36. С. 2–6.
29. Blagojevic M., Jinks C., Jeffery A., Jordan K. P. Risk factors for onset of osteoarthritis of the knee in older adults: a systematic review and meta-analysis // Osteoarthritis Cartilage. 2010. Vol. 18. № 1. P. 24–33.

30. D i x F. P., B r o o k e R., M c C o l l u m C. N. Venous Disease is Associated with an Impaired Range of Ankle Movement // European Journal of Vascular and Endovascular Surgery. 2003. Vol. 25. № 6. P. 556–561.
31. F i n d l a y D. M. Vascular pathology and osteoarthritis // Rheumatology (Oxford). 2007. Vol. 46. № 12. P. 1763–1768.
32. F o w k e s F. G. R. Epidemiology of venous disorders. Venous and lymphatic diseases. Venous ulcers / Ed. by J. J. Bergan, C. K. Shortell. Elsevier, 2007. P. 15–25.
33. G l o v i c z k i P., C o m e r o t a A. J., D a l s i n g M. C. et al. The care of patients with varicose veins and associated chronic venous diseases: Clinical practice guidelines of the Society for Vascular Surgery and the American Venous Forum // Journal of Vascular Surgery. 2011. Vol. 53. № 16S. P. 2S–48S.
34. J e a n n e r e t C., K a r a t o l i o s K. Varicose veins: A critical review of the definition and the therapeutical options // Vasa. 2011. Vol. 40. Is. 5. P. 344–358.
35. O u e d r a o g o D. D., S e o g o H., C i s s e R. et al. Risk factors associated with osteoarthritis of the knee in a rheumatology outpatient clinic in Ouagadougou, Burkina Faso // Med. Trop. (Mars). 2008. Vol. 68. № 6. P. 597–599.
36. S c u d e r i A., R a s k i n B., S c u d e r y N. P. et al. Epidemiological study of the venous desease of the lower limbs in the southeast region of Brasil // 14th World Congress of the Union Internationale de Phlebologie. September 9–14. Rome, 2001. P. 112.
37. W a n g L., F r i t t o n S. P., W e i n b a u m S., C o w i n S. C. On bone adaptation due to venous stasis // J. Biomech. 2003. № 36. P. 1439–1451.

Shcheglov E. A., Emergency Care Hospital (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vezikova N. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Dudanov I. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Alontseva N. N., Emergency Care Hospital (Petrozavodsk, Russian Federation)
Balashov A. T., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ROLE OF VENOUS OUTFLOW DISORDERS IN KNEE OSTEOARTHRITIS DEVELOPMENT (PAPER REVIEW)

The article deals with the problem of combined pathology – varicose veins of the lower limbs and osteoarthritis of the knee. A review of the modern Russian and foreign literature on the subject was conducted. The publications focus on the analysis of venous outflow disorders leading to the development of osteoarthritis of the knee. The studied and reviewed research papers also deal with the clinical picture of gonarthrosis aggravated by varicose disease. It is well-known that this condition enhances and modifies pain inherent to this disease.

Key words: chrovaricosity, osteoarthrosis of the knee

REFERENCES

1. A v e r ' y a n o v M. Yu., I z m a y l o v S. G., I z m a y l o v G. A. et al. *Khronicheskie zabolevaniya ven nizhnikh konechnostey* [Cronic Venous Diseases of Lower Extremities]. Nizhniy Novgorod, Nizhpoligraf Publ., 2002. 128 p.
2. A g a b a b o v a Ye. R. Osteoarthritis osteoartroza. Treatment [Printsipy lecheniya osteoartroza]. *Klin. Revmatologiya* [Clinical Rheumatology]. 1995. № 4. P. 3–6.
3. B r e d i k h i n R. A. *Ul'trazvukovoe angioskanirovanie v diagnostike i vybore metoda lecheniya varikoznoy bolezni i ee retsidivov. Diss kand. med. nauk* [Vascular Ultrasound in Diagnosis and Treatment ov Veins Varicosity and it''s Recurrence. PhD. med. sci. diss.]. Kazan', 2002. 116 p.
4. V e z i k o v a N. N. *Otsenka effektivnosti bolezn'-modifitsiruyushchikh preparatov i lokal'nykh metodov terapii pri osteoartroze kolennykh sustavov. Diss. doct med. nauk* [Illness Modifiing Drugs and Efficacy in Gonarthritis Treatment Evaluation. Dr. med. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2005. 230 p.
5. V o r o b ' y e v D. V. *Kompleksnoe lechenie gonartroza u patsientov pozhilogo i starcheskogo vozrasta s primeneniem sposoba DJeNS-foreza. Diss. kand. med. nauk* [Gonarthritis Complex Treatment in Old Patients with DENS-foresis. PhD. med. sci. diss.]. Samara, 2007. 124 p.
6. G u r ' y e v V. N. Sinovial Blood Flow in Arthritis [Sinovial'nyy krovotok pri artroze]. *Trudy 2-go vserossiyskogo s''ezda travmatologov-ortopedov* [Proc. 2 All Russia Congress of Traumatologists and Orthopedic Surgeons]. Leningrad, 1973. P. 180–185.
7. D a k h i A. *Kharakteristika reaktivnogo sinovita pri gonartroze (kliniko-instrumental'noe sopostavlenie). Avtoref diss. kand. med. nauk* [Reactivity Sinovitis in Gonarthritis (Klinical-Instrumental Correlation). PhD. med. sci. diss. thesis]. Moscow, 1994. 24 p.
8. D o l g a n o v a T. I., S a z o n o v a N. V. Evaluation of Periferal Haemodynamics in Patients with Knee Osteoarthritis [Otsenka perifericheskoy gemodinamiki u bol'nykh s osteoartrozom kolennogo sustava II stadii]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental investigations]. 2009. № 4. P. 29–31.
9. D o l g a n o v a T. I., C h e g u r o v O. K., K a r a s e v a T. Yu., K a r a s e v E. A. Evaluation of Periferal Haemodynamics in Patients with Knee Osteoarthritis Stage 2–3 During the Ostheotomy and Knee Arthroscopy [Otsenka perifericheskoy gemodinamiki u bol'nykh s gonartrozom II–III stadii pri lechenii metodikoy korrigiruyushchey osteotomii v sochetanii s artroskopiey]. *Regionarnoe krovoobrashhenie i mikrocirkulyatsiya* [Regional Blood Circulation and Microcirculation]. 2011. Vol. 10. № 3. P. 38– 43.
10. Z o l o t u k h i n I. A. DEVA-2 Scrining Investigation: Risk Factors and Trend Peculiarities of Chronic Vein Disorders in Russian Women [Skriningovoe issledovanie DEVA-2: faktory riska i osobennosti techeniya khronicheskikh zabolevaniy ven u rossiyskikh zhenshchin]. *Flebolimfologiya* [Phlebolymphology]. 2008. № 34. P. 11–14.
11. K a t o r k i n S. E., S i z o n e n k o Ya. V. Features of Diagnosis and Treatment Tactics in Patients with Chronic Vein Insufficiency and Sceletal Disorders [Osobennosti diagnostiki i taktiki lecheniya patsientov s khronicheskoy venoznoy nedostatochnost'yu i narusheniyami oporno-dvigatel'nogo apparata]. Materialy VIII nauchno-prakticheskoy konferentsii Assotsiatsii flebologov Rossii s mezhdunarodnym uchastiem [Matherials of 8 Scientific and Practical Conference of the Russian Association of Phlebologists with International Participation]. *Flebologiya* [Phlebology]. 2010. Vol. 4. № 2. P. 53–54.

12. K o v a l e v P. V. *Metody revaskulyarizatsii i dekompressii subkhondral'noy zony v khirurgicheskom lechenii deformiruyushchego gonartroza (kliniko-eksperimental'noe issledovanie). Diss. kand. med. nauk* [Clinical and Physical Rehabilitation Peculiarities in Gonarthrosis Combined with Varicosity. PhD. med. sci. diss.]. Kursk, 2002. 146 p.
13. K o z l o v a O. G. *Lokal'naya myshechnaya slabost' i venoznaya gipertenziya pri gonartroze. Dis. kand. med. nauk* [Local Muscular Weakness and Venous Hypertension in Gonarthrosis. PhD. med. sci. diss.] Jaroslavl', 2011. 113 p.
14. K o n s t a n t i n o v a G. D., Z u b a r e v A. R., G r a d u s o v E. G. *Flebologiya* [Phlebology]. Moscow, Vidar-M Publ., 2000. 160 p.
15. M a t v e e v R. P., B r a g i n a S. V. Social Characteristics of Outpatient Patients with Gonartritis [Sotsial'naya kharakteristika ambulatornykh bol'nykh osteoartrozom kolennogo sustava]. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2011. № 4. P. 50–55.
16. N a g i b i n R. M. *Osobennosti kliniki i fizicheskoy reabilitatsii u bol'nykh gonartrozom v sochetanii s varikoznoy bolezn'yu ven. Dis. kand. med. nauk* [Clinical and PysicalRehabilitation Peculiarities in Gonarthrosis Combined with Varicosity. PhD. med. sci. diss.]. Yaroslavl', 2011. 154 p.
17. N o s k o v S. M., K o z l o v a O. G., N a g i b i n R. M. et al. Vein Flow Disorders in Joint Syndrom Creation in Primary Gonarthritis Patients [Narusheniya venoznogo ottoka v modulyatsii sustavnogo sindroma u bol'nykh pervichnym gonartrozom]. *II Vserossiyskiy kongress revmatologov Rossii (Tezisy)* [2 All Russian Rheumatology Congress]. Yaroslavl', 2011. P. 55.
18. N o s k o v S. M., M a r g a z i n V. A., S h k r e b k o A. N. *Reabilitatsiya pri zabolevaniyakh serdtsa i sustavov* [Cardiac and Vascular Diseases Rehabilitation]. Moscow, Geotar-Media Publ., 2009. 640 p.
19. P o z i n A. A. *Znachenie perifericheskogo krovoobrashheniya v formirovanii strukturnykh i funktsional'nykh narusheniy kolennykh i tazobedrennykh sustavov u bol'nykh revmatoidnym artritom i osteoartrozom. Avtoref. Diss d-ra med. nauk* [The Role of Peripheral Blood Circulation and Knee and Hip Functional Disorders in Patients with Rheumadoid Arthritis and Osteoarthritis. Dr. med. sci. diss. thesis]. Yaroslavl', 2000. 43 p.
20. *Revmatologiya. Natsional'noe rukovodstvo* [Rheumatology. National Guidance]. Moscow, Geotar-Media Publ., 2008. 714 p.
21. S a v e l' y e v B. S., G o l o g o r s k i y V. A., K i r i e n k o A. I. et al. *Flebologiya. Rukovodstvo dlya vrachey* [Phlebology. Guidance for Doctors]. Moscow, Meditsina Publ., 2001. 660 p.
22. S a v e l' y e v V. S., K i r i e n k o A. I., B o g a c h e v V. Yu. Chronic Vein Diseases in Russian Federation. The Results of International Investigating Programm "Vein Consult" [Khronicheskie zabolevaniya ven v Rossiyskoy Federatsii. Rezul'taty mezhdunarodnoy issledovatel'skoy programmy "Vein Consult"]. *Flebologiya* [Phlebology]. 2010. № 3. P. 9–12.
23. S a l i k h o v I. G., V o l k o v a Ye. R., Y a k u p o v a S. P. Periarticular Use of Chondroprotactors in Patients wirh Gonarthrosis ans Signs of Tendens Disorders [Periartikulyarnoe primenenie khondroprotektorov u bol'nykh gonartrozom s priznakami porazheniya sukhozhil'no-svyazochnogo apparata]. *Consilium Medicum*. 2006. Vol. 8. № 2. P. 18–23.
24. S a l i k h o v I. G., L a p s h i n a S. A., M y a s o u t o v a L. I. et al. Osteoarthritis and Lower Limbs Peripheral Veins Diseases: Peculiarities of Combined Pathology [Osteoartroz i zabolevaniya perifericheskikh ven nizhnikh konechnostey: osobennosti sochetannoy patologii]. *Terapevticheskiy arkhiv* [Theraputic Archives]. 2010. № 5. P. 58–60.
25. S v e t l o v a M. S., V e z i k o v a N. N. Clinic-Instrumental and Laboratory Characteristics of Early Gonarthritis [Kliniko-instrumental'naya i laboratornaya kharakteristika rannikh stadiy gonartroza]. *Terapevticheskiy arkhiv* [Theraputic Archives]. 2010. № 5. P. 54–58.
26. S o k o v L. P., R o m a n o v M. F. *Deformiruyushchie artrozy krupnykh sustavov* [Large Joints Arthrosis]. Moscow, UDN Publ., 1991. 119 p.
27. S o k o l o v a T. V. *Rol' gemodinamicheskikh faktorov v formirovanii osteoartroza kolennykh i tazobedrennykh sustavov. Diss. kand. med. nauk* [The Role of Haemodynamic Factors in Knee and Hip Osteoarthritis development. PhD. med. sci. diss.]. Yaroslavl', 1999. 114 p.
28. S h e k o y a n A. O., B o g a c h e v V. Yu. Venous Pain: Patophysiology and Priciples of Treatment [Venoznaya bol': patofiziologiya i printsipy lecheniya]. *Flebolimfologiya* [Phlebolymphology]. 2010. № 36. P. 2–6.
29. B l a g o j e v i c M., J i n k s C., J e f f e r y A., J o r d a n K. P. Risk factors for onset of osteoarthritis of the knee in older adults: a systematic review and meta-analysis // Osteoarthritis Cartilage. 2010. Vol. 18. № 1. P. 24–33.
30. D i x F. P., B r o o k e R., M c C o l l u m C. N. Venous Disease is Associated with an Impaired Range of Ankle Movement // European Journal of Vascular and Endovascular Surgery. 2003. Vol. 25. № 6. P. 556–561.
31. F i n d l a y D. M. Vascular pathology and osteoarthritis // Rheumatology (Oxford). 2007. Vol. 46. № 12. P. 1763–1768.
32. F o w k e s F. G. R. Epidemiology of venous disorders. Venous and lymphatic diseases. Venous ulcers / Ed. by J. J. Bergan, C. K. Shortell. Elsevier, 2007. P. 15–25.
33. G l o v i c z k i P., C o m e r o t a A. J., D a l s i n g M. C et al. The care of patients with varicose veins and associated chronic venous diseases: Clinical practice guidelines of the Society for Vascular Surgery and the American Venous Forum // Journal of Vascular Surgery. 2011. Vol. 53. № 16S. P. 2S–48S.
34. J e a n n e r e t C., K a r a t o l i o s K. Varicose veins: A critical review of the definition and the therapeutical options // Vasa. 2011. Vol. 40. Is. 5. P. 344–358.
35. O u e d r a o g o D. D., S e o g o H., C i s s e R. et al. Risk factors associated with osteoarthritis of the knee in a rheumatology outpatient clinic in Ouagadougou, Burkina Faso // Med. Trop. (Mars). 2008. Vol. 68. № 6. P. 597–599.
36. S c u d e r i A., R a s k i n B., S c u d e r y N. P. et al. Epidemiological study of the venous disease of the lower limbs in the southeast region of Brasil // 14th World Congress of the Union Internationale de Phlebologie. September 9–14. Rome, 2001. P. 112.
37. W a n g L., F r i t t o n S. P., W e i n b a u m S., C o w i n S. C. On bone adaptation due to venous stasis // J. Biomech. 2003. № 36. P. 1439–1451.

Поступила в редакцию 12.03.2012

Июнь, № 4 **Науки о Земле** **2013**

УДК 550.42:546.3:627.147(470.22)

ЗАХАР ИВАНОВИЧ СЛУКОВСКИЙ
аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет, старший лаборант-исследователь, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
slukovsky87@gmail.com

ТАТЬЯНА ПЕТРОВНА БУБНОВА
научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
bubnova@krc.karelia.ru

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ФРАКЦИИ <0,1 ММ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ НЕГЛИНКИ – ИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОГО ВОДОТОКА

Донные отложения городских рек являются аккумуляторами загрязняющих веществ (например, тяжелых металлов), поступающих как из воздушной среды, так и из неочищенных промышленных и канализационных стоков. Основным фактором, обуславливающим формирование химического состава осадков, является их гранулометрический состав [5]. Целью данной работы являлось обоснование использования фракции <0,1 мм донных отложений малой реки Неглинки (г. Петрозаводск) для оценки экологического состояния городской части водотока. Гранулометрический анализ выполнялся при помощи анализатора частиц серии LS13 320. Химический состав донных отложений был определен на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Определялись концентрации Zn, Cd, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, Sb, Sn, V, Mn и W. Проведен ранговый корреляционный анализ Спирмена между концентрациями металлов в валовой фракции <2,0 мм и их содержанием в образцах проб различных гранулометрических фракций. В результате установлена положительная (в ряде случаев высокая) корреляционная зависимость между концентрациями Zn, Cd, Pb, Co, Cu, Sb, Sn, V, Mn и W и самыми тонкими фракциями (<0,005, 0,005–0,05, 0,05–0,1 и 0,1–0,25 мм) отложений реки и отрицательная – относительно фракций >0,25 мм. Выявлена особая геохимическая ассоциация Cr-Ni-Mo, соответствующая, согласно литературным данным, подобной ассоциации в почвах г. Петрозаводска. Выявлен качественный вклад фракции <0,1 мм донных отложений Неглинки в валовый химический состав грунтов в накоплении тяжелых металлов. Лучше всего в этой фракции отложений реки аккумулируются такие металлы, как Cd, W, Sn, Mn и V.

Ключевые слова: тяжелые металлы, донные отложения, малая река, гранулометрический состав, корреляционный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Стремительный рост городов не может не сказываться на ухудшении состояния природных сред, затронутых процессом урбанизации. Город Петрозаводск – не исключение [1], [6], [9], [12], [13], [16] и др. Согласно государственным докладам о состоянии окружающей среды Республики Карелия, в 2010 и 2011 годах количество взвешенных веществ, в состав которых входят ионы тяжелых металлов (ТМ), в атмосферном воздухе над территорией столицы Карелии составляло 0,114 и 0,104 мг/м^3 в среднем за год соответственно. По данным снеговой съемки Петрозаводска [9], установлено превышение концентраций Zn, Cd, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, Sb, V, Mn и W относительно фоновых значений. Основными аккумуляторами загрязнителей, поступающих из воздушной среды, являются такие инертные геологические формации, как почва и донные отложения (ДО) водных объектов. Последние кроме атмосферных поллютантов накапливают вещества, поступающие из неочищенных промышленных и/или дождевых канализационных стоков [1].

Согласно [5], наиболее значительным физическим фактором, обуславливающим формирование химического состава ДО, является гранулометрический (зерновой, или механический) состав осадков. У разных исследователей ([18], [19], [20]) можно обнаружить данные о положительной взаимосвязи между содержанием в речных ДО химических элементов, имеющих антропогенное происхождение, и составом тонких гранулометрических фракций (тонкопесчаных, алевритовых и глинистых).

По данным [8], в 1999 году в воде городской части р. Неглинки установлены превышения концентраций Pb (в 4,4 раза), Zn (3,6) и Cu (2,8) над концентрациями этих металлов в воде загородной части водотока. Кроме того, в [8] оценен уровень аккумуляции ТМ водорослями *Zygnema sp.*; превышения концентраций над фоновыми значениями установлены по Pb (2,9), Cu (2,9), Zn (2,2), Cd (1,5), Ni (1,5), Cr (1,4) и Co (1,1). В настоящей работе представлены первые результаты исследования химического и гранулометрического состава русловых отложений городской части малой реки Неглинки. Показана экологическая значимость тонкопесчано-алеврито-глинистой фракции осадка, несущей информацию о значительном загрязнении водного объекта химическими элементами.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Неглинка – малая, типичная для Фенноскандинавского региона река длиной около 14 км [7]. В своем среднем и нижнем течении (около 8 км) она протекает по территории города Петрозаводска (Республика Карелия), впадая в Онежское озеро. Дно реки сложено как валунно-галечным ледниковым материалом, так и более современными глинисто-алеврито-песчаными отложениями. Ранее проведенные исследования [14] выявили значительное количество грубо-, крупно-, средне- и мелкозернистых песчаных частиц по сравнению с тонкозернистыми, алевритовыми и глинистыми наносами. В связи с этим ДО Неглинки нельзя назвать «классическими» техногенными илами (за исключением отдельных участков), которыми, по представлениям Е. П. Янина [17], характеризуются водные объекты урбанизированных территорий.

Полевые исследования проведены в июне 2011 года. Ширина реки в это время года достигает 3–5 м, глубина – до 2 м. Для исследований отобраны пробы из верхнего слоя (до 10 см) ДО в пределах русловой части водотока по всей длине его городской части (всего 12 образцов) и одна проба (№ 13) – в пригородной части реки (рис. 1а). Пробы отбирались при помощи дночерпателя системы Экмана – Берджи (площадь захвата – 225 см^2). Вес образцов составлял 300–400 г. Использованы методические рекомендации по отбору проб ДО [4], [10]. Далее пробы

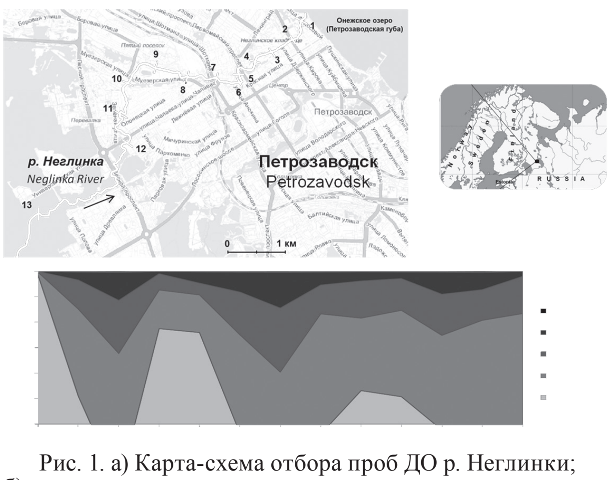


Рис. 1. а) Карта-схема отбора проб ДО р. Неглинки; б) диаграмма процентного соотношения гранулометрических фракций исследуемых образцов

просушивались до воздушно-сухого состояния в комнатных условиях на чистых белых листах бумаги. Чтобы максимально сохранить зерна глинистой фракции всех образцов ДО, жидкая часть пробы просушивалась отдельно – в стеклянных чашках Петри.

После просушки пробы перемешивались и просеивались через сито с размером ячеек 2 мм. Часть каждой пробы для определения гранулометрического состава исследуемых образцов анализировалась при помощи многофункционального анализатора частиц серии LS13 320 (Beckman Coulter) методом лазерной дифрактометрии [14]. При описании гранулометрических фракций использована классификация Л. Б. Рухина, согласно которой фракция с размером зерен <0,005 мм соответствует глинистым, 0,005–0,05 мм – алевритовым, 0,05–0,1 мм – тонкопесчаным, 0,1–0,25 мм – мелкопесчаным, 0,25–0,5 – среднепесчаным и 0,5–2 мм – крупно- и грубопесчаным отложениям [11].

Определение элементного состава фракции <2 мм после истирания до порошкообразного состояния производилось на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES-2 с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Кроме того, часть каждой пробы просеивалась через сито с размером ячеек 0,1 мм и также анализировалась на масс-спектрометре. Контроль качества определения концентраций химических элементов проверялся по стандартному образцу ГСО 7126–94 – химический состав донного ила озера Байкал (БИЛ-1). Погрешности измерений указаны в табл. 1. Лабораторные исследования проводились на базе Института геологии Карельского научного центра РАН.

При определении корреляционных связей между полученными аналитическими данными химического и механического состава ДО Неглинки использовался ранговый корреляционный анализ Спирмена. Кластерный анализ проводился при помощи программы Statgraphics plus 2.1. Рисунки и диаграммы были выполнены при помощи программ MapInfo Professional 9.0.2, Microsoft Office PowerPoint и Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После проведения химического анализа были получены концентрации ТМ в пробах фракций <2,0 и <0,1 мм (табл. 1), соответствующих, согласно ГОСТу РФ 17.4.1.02–83 «Классификация химических веществ для контроля загрязнения», 3 классам опасности: Cd, Pb и Zn (высоко опасные), Co, Ni, Mo, Cu, Cr и Sb (умеренно опасные) и V, W и Mn (мало опасные) [2].

Корреляционные зависимости между полученными валовыми концентрациями металлов во фракции <2,0 мм и содержанием разных гранулометрических фракций во всех изученных образцах представлены в табл. 2. Из представ-

Таблица 1

Концентрации ТМ в валовой фракции (<2,0 мм) и фракции <0,1 мм ДО р. Неглинки

Гранул. фракции, мм		Тяжелые металлы, г/т												
		V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Sn	Sb	W	Pb
<2,0	xср.	77,2	52,6	734,3	11,5	36,1	63,8	104,2	3,1	2,1	2,3	1,0	2,5	28,7
	xmax	143,9	108,7	2688,4	24,2	70,4	121,3	225,3	7,3	3,7	5,4	2,3	9,5	67,0
	xmin	47,6	37,6	329,5	6,3	18,4	29,3	32,8	0,7	1,0	0,2	0,3	0,7	11,9
<0,1	xср.	148,2	58,9	1370,1	18,2	30,1	71,7	154,5	1,1	6,2	5,0	1,4	4,1	38,9
	xmax	175,3	71,0	3230,6	25,3	36,8	104,8	239,1	1,5	11,0	11,7	2,3	7,8	101,5
	xmin	72,6	48,1	443,8	8,5	20,5	12,0	41,1	0,7	3,32	1,1	0,2	0,4	15,5
xпогр.		3,5	1,2	15,7	0,3	1,1	1,1	2,4	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1	0,4

Примечание. xср. – среднее (невзвешенное) значение концентрации ТМ (без учета пробы № 13), xmax и xmin – максимальное и минимальное значения концентрации ТМ, xпогр. – величина погрешности измерения.

ленных данных (крайняя правая колонка) видно, что по 10 из 13 элементов коэффициенты корреляции между концентрациями ТМ и содержанием фракции <0,1 мм в образцах ДО достигают высокого уровня ($r > 0{,}70$ при $p < 0{,}05$). Особенно это касается Sb и W: 0,92 и 0,96 соответственно. Коэффициенты корреляции остальных элементов выстраиваются в следующий ряд (по убыванию): V > Zn > Cd = Cu > Co > Sn > Pb > Mn > Ni > Cr > Mo.

Тенденция увеличения коэффициента корреляции от фракции 0,05–0,1 мм к фракции <0,005 мм наблюдается по 5 элементам: Mn, Co, Zn, Sb и Pb. Чуть более низкое значение коэффициентов корреляции (по сравнению с фракцией 0,005–0,05 мм) между содержанием глинистой составляющей отложений реки и концентрациями таких металлов, как V, Cu, Cd, W, может быть связано с особой ассоциацией между ними, а также с неизбежными потерями самых легких частиц при пробоподготовке. Таким образом, лучше всего взаимосвязь между химическим и гранулометрическим составом водных грунтов р. Неглинки иллюстрирует алевритовая фракция отложений.

Обращает на себя внимание низкое значение коэффициентов корреляции ($p > 0{,}05$) между концентрациями Ni, Cr и Mo и процентным содержанием фракции <0,1 мм и отдельно – содержанием тонкопесчаной, алевритовой и глинистой фракций. Однако концентрации Ni и Cr имеют среднюю значимую корреляционную связь ($r_{Ni-(0,1-0,25)} = 0{,}65$, $r_{Cr-(0,1-0,25)} = 0{,}64$) с содержанием мелкопесчаной фракции. Согласно данным кластерного анализа, между значениями рангов концентраций исследуемых ТМ (рис. 2), Ni, Mo

Таблица 2

Коэффициенты корреляции Спирмена между концентрациями ТМ в ДО р. Неглинки и содержанием различных гранулометрических фракций в исследуемых образцах проб (n = 13)

Элементы	Гранулометрические фракции, мм						
	<0,005	0,005–0,05	0,05–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	>0,5	<0,1
V	**0,77**	**0,84**	**0,69**	**0,77**	-0,41	**-0,79**	**0,89**
Cr	0,56	0,34	0,47	**0,64**	**-0,74**	**-0,62**	0,45
Mn	**0,88**	**0,76**	**0,57**	**0,57**	-0,36	**-0,59**	**0,71**
Co	**0,73**	**0,71**	**0,58**	**0,74**	-0,44	**-0,75**	**0,79**
Ni	0,51	0,41	0,55	**0,65**	**-0,85**	**-0,63**	**0,58**
Cu	**0,66**	**0,73**	**0,69**	**0,79**	-0,53	**-0,81**	**0,84**
Zn	**0,80**	**0,77**	**0,70**	**0,89**	**-0,56**	**-0,90**	**0,85**
Mo	0,23	0,07	0,25	0,52	**-0,77**	-0,49	0,23
Cd	**0,66**	**0,78**	**0,74**	**0,73**	-0,45	**-0,71**	**0,84**
Sn	**0,78**	**0,74**	**0,75**	**0,70**	**-0,78**	**-0,72**	**0,77**
Sb	**0,87**	**0,84**	**0,76**	**0,84**	**-0,58**	**-0,85**	**0,92**
W	**0,84**	**0,88**	**0,81**	**0,75**	-0,47	**-0,75**	**0,96**
Pb	**0,78**	**0,72**	**0,65**	**0,68**	-0,32	**-0,69**	**0,73**

Примечание. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции ($p < 0{,}05$).

и Cr образуют четкую ассоциацию между собой. Подобная ассоциация выделяется в химическом составе почв г. Петрозаводска [3], что может свидетельствовать о высокой роли процесса разрушения берегов (эрозии) в образовании донных отложений реки Неглинки, а следовательно, и переносе части загрязняющих веществ из одной геологической формации в другую. Высокие коэффициенты корреляции ($r > 0,70$ при $p < 0,05$) между мелкопесчаной фракцией ДО и концентрациями других металлов (V, Co, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb и W) также могут быть связаны с загрязнением почвенного покрова территории, прилегающей к реке.

По геохимической классификации В. М. Гольдшмита 1924 года (в интерпретации В. В. Щербины) [15], тесная связь Cd, Cu, Zn и Sb (рис. 2) может быть объяснена сродством этих элементов с сульфидными минералами (халькофильная группа). Кроме того, есть основания выделить ассоциацию V и W, которые, согласно вышеупомянутой классификации, относятся к литофильным элементам, тяготеющим к силикатным минералам. К группе сидерофильных элементов, имеющих сродство с соединениями железа, по Гольдшмиту/Щербине относятся Co, Ni, Sn и Mo.

Стоит также отметить, что, по данным современных исследований [2], существуют разнообразные механизмы закрепления ТМ в почвах не только алюмосиликатами и гидроокислами Fe, но и различными соединениями Mn. Из рис. 3 видно, что Mn имеет статистически значимую положительную связь ($p < 0,05$) со всеми (кроме хрома и молибдена) изученными ТМ. Коэффициенты корреляции концентраций этих элементов с концентрацией марганца выстраиваются в следующий ряд (по убыванию): Pb > Sn > Zn > Sb > W > Co > Cu > V > Cd > Ni. Согласно почвенной классификации по Водяницкому, к манганофильным ТМ относятся Zn, Pb, Cu, Cd, Ni и Co, что соответствует представленным выше результатам.

Наконец, концентрации всех изученных ТМ отрицательно коррелируют со значениями содержаний фракций 0,25–0,5 и >0,5 мм. Данный факт указывает на низкую сорбционную способность средне-, крупно- и грубопесчаных зерен ДО Неглинки, по химическому составу которых, по видимому, нельзя объективно оценить уровень загрязнения экосистемы петрозаводской реки.

Таким образом, установлено, что к точкам отбора проб № 2, 3, 7, 8 и 11 (рис. 1б), где отмечены наибольшие значения легких фракций ДО Неглинки, приурочены самые высокие концентрации ТМ во фракции <2,0 мм. Самые низкие концентрации ТМ, наоборот, приурочены к местам накопления тяжелых фракций грунтов (0,25–2,0 мм). Особенно это относится к условно-фоновому пригородному участку реки (точка № 13), где минимальные значения концентраций отмечены по 6 элементам (V, Cd, Sn, Sb, W и Pb).

Результаты химического анализа фракции <0,1 мм ДО исследуемой петрозаводской реки (табл. 3) подтверждают представленную выше зависимость между гранулометрическим и валовым (фракция <2,0 мм) химическим составом грунтов. Элементы выявленной геохимической ассоциации Cr-Ni-Mo, концентрации которых имеют самую низкую корреляцию с тонкопесчано-алеврито-глинистой фракцией, составляют в ней менее 40 % (Cr) и менее 30 % (Ni и Mo) по всем образцам проб. Небольшой вклад концентраций свинца и меди во фракции <0,1 мм (<30 % по 7 пробам Pb и 10 Cu) в валовый химический состав отложений объясняется невысоким вкладом глинистой (только Cu) и тонкопесчаной (оба металла) фракций в химический состав ДО (табл. 1).

Наибольший вклад фракции <0,1 мм в накоплении ТМ отмечен по Cd (>40 % по 11 пробам ДО и >50 % – по 8), W (>40 % по 8 пробам ДО и >50 % – по 5), Sn (>40 % по 6 пробам ДО и >50 % – по 4), Mn (>40 % по 5 пробам

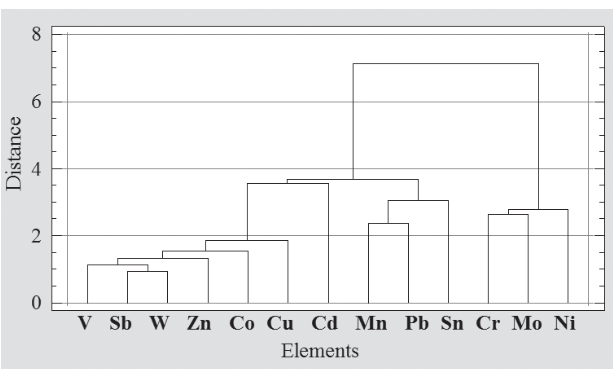


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа (метод «ближайшего соседа») по данным рангов концентраций ТМ в валовой фракции ДО р. Неглинки

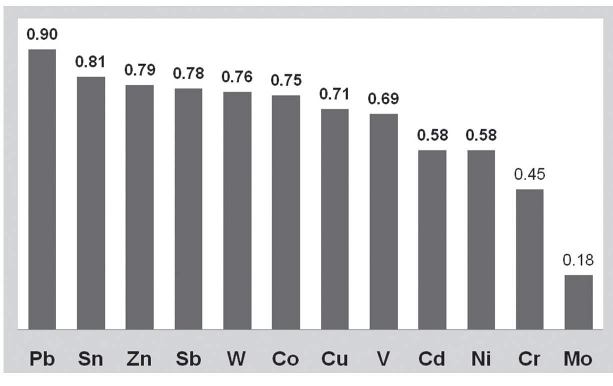


Рис. 3. Результат корреляционного анализа Спирмена между концентрациями Mn и другими ТМ в ДО р. Неглинки (фракция <2,0 мм)

Таблица 3

Вклад концентраций ТМ во фракции <0,1 мм в валовый химический состав проб ДО р. Неглинки, %

№ п/п	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Sn	Sb	Pb	W
1	40,9	14,3	34,9	30,3	9,5	9,0	25,2	2,8	64,8	17,3	22,0	26,9	58,22
2	21,9	11,3	23,1	20,1	10,0	18,3	19,6	3,9	25,1	33,9	19,3	17,2	17,36
3	49,3	37,5	56,1	42,5	23,1	21,7	47,1	22,2	60,4	99,2	45,0	38,0	50,32
4	47,3	17,5	41,9	31,6	11,6	22,6	28,2	5,0	61,2	32,1	68,2	44,0	72,19
5	46,2	35,6	58,0	38,2	26,8	37,4	46,6	13,8	59,0	74,3	49,4	36,2	62,83
6	42,1	21,4	37,6	28,1	21,1	22,4	29,8	10,1	52,1	38,8	24,5	20,6	40,85
7	36,9	34,9	36,4	35,8	25,5	30,2	30,1	11,9	49,6	57,7	30,0	30,4	32,44
8	48,3	28,0	43,0	42,2	21,3	29,8	37,9	8,2	75,2	28,8	15,0	30,4	62,82
9	25,2	18,3	37,4	24,0	14,6	21,4	30,3	6,8	41,8	51,8	29,3	17,7	40,63
10	26,9	9,3	30,2	23,8	6,9	17,7	24,0	2,0	44,4	42,0	32,4	15,3	21,13
11	44,0	30,4	41,7	40,7	21,9	36,4	39,8	7,7	59,2	46,2	35,0	35,8	44,89
12	32,7	28,2	19,2	20,6	18,0	16,3	14,5	15,3	85,3	22,0	14,4	8,8	31,52
13	1,11	0,9	0,9	0,8	0,4	0,3	0,8	0,2	2,4	3,4	0,5	1,0	0,49

ДО и >50 % – по 2) и V (>40 % по 7 пробам ДО). Проба № 13, взятая в пригородной лесной зоне Петрозаводска, характеризуется низким (0,2–3,4 %) вкладом тонкопесчано-алеврито-во-глинистой фракции в аккумуляции всех изученных элементов. Поскольку остающиеся 99,8–96,6 %, вероятно, приходятся на фоновые концентрации ТМ, данный факт говорит о большой роли фракции <0,1 мм в процессе геохимического загрязнения грунтов городской части водотока. В образцах № 1–12 ДО Неглинки часть концентраций ТМ приходится на более крупные песчаные фракции, попадающие в реку в результате эрозии, то есть не напрямую, а мигрируя из загрязненного почвенного покрова, что требует отдельного (дополнительного) исследования.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования по сопоставлению данных гранулометрического и химического состава ДО городской части малой реки Неглинка выявили положительную (в ряде случаев высокую) корреляционную связь между концентрациями V, Mn, Co, Cu, Zn, Cd, Sn, Sb, W и Pb и тонкопесчано-алеврито-глинистой фракцией грунтов и ее составляющими. Оставшиеся элементы (Cr, Ni и Mo) входят в особую геохимическую ассоциацию, связанную со среднезернистыми и еще более крупными песчаными фракциями, привнесенными из почвы. Это подтверждается и литературными данными по исследованию почв г. Петрозаводска [3], и высокой корреляционной зависимостью между концентрациями этих ТМ. Кроме того, был оценен качественный вклад концентраций ТМ во фракции <0,1 мм в валовый химический состав изученных проб ДО. В этой фракции водных грунтов петрозаводской реки аккумулируются преимущественно Cd, W, Sn, Mn и V. Ранее проведенные исследования [13] выявили закономерное ухудшение видового разнообразия бентофауны реки Неглинки при увеличении валовых концентраций этих ТМ в ДО реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышев И. А., Хренников В. В., Лузгин В. К. Влияние городских стоков на бентосных беспозвоночных пороговых участков р. Лососинка (Карелия) // Биология внутренних вод. 2001. № 4. С. 73–78.
2. Водяницкий Ю. Н. Свойства тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Агрохимия. 2009. № 8. С. 85–94.
3. Геоэкологическая модель развития Республики Карелия: геохимические и климатические аспекты формирования экологических рисков: Отчет о научно-исследовательской работе / Д. С. Рыбаков, Н. В. Крутских, Т. С. Шелехова и др. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2012. 117 с.
4. ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность.
5. Даувальтер В. А. Факторы формирования химического состава донных отложений озер: Учеб. пособие. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2002. 75 с.
6. Казнина Н. М., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф., Батова Ю. В. Влияние промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на морфологические признаки растений *Phleum pratense L.* // Труды КарНЦ РАН. 2009. № 3. С. 50–55.
7. Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова, А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. 290 с.
8. Комулайнен С. Ф., Морозов А. К. Изменение структуры фитоперифитона в малых реках урбанизированных территорий // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 356–363.

9. К р у т с к и х Н. В., К р и ч е в ц о в а М. В. Анализ техногенного загрязнения снежного покрова г. Петрозаводска // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Материалы 2-й междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2011. С. 32–34.
10. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами / Ю. Е. Сает, Л. Н. Алексинская, Е. П. Янин. М.: ИМГРЭ, 1982. 74 с.
11. Р у х и н Л. Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах. Л.: Недра, 1969. 704 с.
12. Р ы б а к о в Д. С., С л у к о в с к и й З. И. Геохимические особенности загрязнения донных осадков зарегулированной городской реки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 67–73.
13. С л у к о в с к и й З. И., П о л я к о в а Т. Н. Макрозообентос реки Неглинки и его связь с химическим составом донных отложений водоема // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии: Материалы XXIII молодежной науч. конф., посвящ. памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца. Петрозаводск: КарНЦ, 2012. С. 89–91.
14. С л у к о в с к и й З. И., Р ы б а к о в Д. С., Б у б н о в а Т. П. Гранулометрический состав донных отложений городской части малой реки Неглинки (Петрозаводск) // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2013. Вып. 15. С. 168–172.
15. Справочник по геохимии / Г. В. Войткевич и др. М.: Недра, 1990. 479 с.
16. С у щ у к А. А., Г р у з д е в а Л. И. Влияние техногенного загрязнения промышленных центров Карелии на сообщества почвенных нематод // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. 2011. № 25. С. 445–452.
17. Я н и н Е. П. Особенности гранулометрического состава русловых отложений малой реки в зоне влияния промышленного города // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 3. С. 69–74.
18. S k o r b i ł o w i c z E., S k o r b i ł o w i c z M. Metals in grain fractions of bottom sediments from selected rivers in north-eastern Poland // Physics and Chemistry of the Earth. 2011. № 36. P. 567–578.
19. S o n g a Y., J i J., Y a n g Z. et al. Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River // Catena. 2011. № 85. P. 73–81.
20. T a y l o r M. P. Distribution and storage of sediment-associated heavy metals downstream of the remediated Rum Jungle Mine on the East Branch of the Finniss River, Northen Territory, Australia // Journal of Geochemical Exploration. 2007. № 92. P. 55–72.

Slukovsky Z. I., Institute of Geology of Karelian Research Centre of RAS,
Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Bubnova T. P., Institute of Geology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

FRACTION <0,1 MM CHEMICAL COMPOSITION OF NEGLINKA RIVER SEDIMENTS – CONTAMINATION INDICATOR OF URBAN STREAM

Bottom sediments of urban rivers accumulate pollutants (for example heavy metals) transported from air and contaminated industrial or sewerage runoffs. The particle-size distribution is a general physical factor forming chemical composition of the riverbed sediments. The authors of the research aimed to substantiate the use of the fraction <0,1 mm of Neglinka river sediment for the ecological assessment of the urban stream (Petrozavodsk, the Republic of Karelia). The grain-size composition of the sediments was measured by a laser diffraction method. Concentrations of Zn, Cd, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mo, Sb, Sn, V, Mn and W were determined by the use of Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). The Spearman's correlation coefficient was used to define correlation of Zn, Cd, Pb, Co, Cu, Sb, Sn, V, Mn and W content in the fraction <2,0 mm. The percentage of samples with lightest fractions (<0,005 mm, 0,005-0,05 mm, 0,05–0,1 mm and 0,1–0,25 mm) is very significant ($p < 0{,}05$). Moreover, the authors detected a specific geochemical association of Cr-Ni-Mo, which correlates with similar associations found in Petrozavodsk soil. We estimated the sediment fraction <0,1 mm contribution into the bulk sample fraction (<2,0 mm) and chemical composition of the accumulated heavy metals. The concentration of Cd, W, Sn, Mn and V accumulated in the clay-silt-fine-sand fraction of the Neglinka sediments were higher than of other metals.

Key words: heavy metals, bottom sediments, small river, particle-size distribution, correlation analysis

REFERENCES

1. B a r y s h e v I. A., K h r e n n i k o v V. V., L u z g i n V. K. Effect of Municipal Sewages on Benthic Invertebrates in Rapids of the Lososinka River (Karelia) [Vliyanie gorodskikh stokov na bentosnykh bespozvonochnykh porogovykh uchastkov r. Lososinka (Karelia)]. *Biologia vnutrennikh vod* [Biology of Inland Waters]. 2001. № 4. P. 73–78.
2. V o d y a n i t s k y Yu. N. Properties of Heavy Metals and Metalloids in Soil [Svoistva tyazhelykh metallov i metalloidov v pochvakh]. *Agrokhimiya* [Agrochemistry]. 2009. № 8. P. 85–94.
3. *Geoekologicheskaya model' razvitiya Respubliki Kareliya: geokhimicheskie i klimaticheskie aspekty formirovaniya ekologicheskikh riskov* [Geoecological development model the Republic of Karelia: geochemical and climatic aspects of the environmental risks formation]. Petrozavodsk: The Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, 2012. 117 p.
4. State standard 17.1.5.01–80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis [GOST 17.1.5.01–80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy vodnykh ob''ektov dlya analiza na zagryaznennost'].
5. D a u v a l ' t e r V. A. *Faktory formirovaniya khimicheskogo sostava donnykh otlozheniy ozer* [Factors of chemical composition formation as bottom sediments of the lakes]. Murmansk, MGTU Publ., 2002. 75 p.
6. K a z n i n a N. M., T i t o v A. F., L a i d i n e n G. F., B a t o v a J. V. Effect of industrial heavy metal pollution of soil on morphological characteristics of *Phleum Pratense L.* [Vliyanie promyshlennogo zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami na morfologicheskie priznaki rasteniy *Phleum Pratense L.*]. *Trudy KarNC RAN* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science]. 2009. № 3. P. 50–55.
7. *Katalog ozer i rek Karelii* [Catalogue of lakes and rivers of Karelia]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS Publ., 2001. 290 p.

8. Komulaynen S. F., Morozov A. K. Variations in phytoperiphyton structure in small rivers flowing over urbanized areas [Izmenenie struktury fitoperifitona v malykh rekakh urbanizirovannykh territoriy]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2007. Vol. 43. № 3. P. 356–363.
9. Krutskikh N. V., Krichevtsova M. V. Analysis of the industrial pollution of snow cover of Petrozavodsk [Analiz tehnogennogo zagryazneniya snezhnogo pokrova g. Petrozavodska]. *Materialy vtoroy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional'nye problemy"* [Proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference "Environmental geology: theory, practice and regional problems"]. Voronezh, 2011. P. 32–34.
10. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya poverkhnostnykh vodotokov khimicheskimi elementami* [Guidelines for the evaluation of geochemical pollution of surface waters by chemical elements]. Moscow, 1982. 74 p.
11. Rukhin L. B. *Osnovy litologii. Uchenie ob osadochnykh porodakh* [Fundamentals of lithology. The doctrine of the sedimentary rocks]. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 704 p.
12. Rybakov D. S., Slukovskiy Z. I. Geochemical characteristics of contaminated bottom sediments of regulated urban river [Geokhimicheskie osobennosti zagryazneniya donnykh osadkov zaregulirovannoy gorodskoy reki]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State university. Natural&Engineering Sciences]. 2012. № 4. P. 67–73.
13. Slukovsky Z. I., Polyakova T. N. Macrozoobenthos of the Neglinka River and its correlation to the chemical composition of the stream bottom sediments [Makrozoobentos reki Neglinki i ego svjaz' s khimicheskim sostavom donnykh otlozhenij vodoema]. *Materialy XXIII molodezhnoj nauchnoj konferencii, posvjashhennoj pamjati chlena-korrespondenta AN SSSR K.O. Kratca "Aktual'nye problemy geologii dokembrija, geofiziki i geojekologii"* [Materials of the youth scientific conference in memory of a member of the USSR Academy of Sciences, KO Kratz "Actual problems, Precambrian Geology, Geophysics, and Geoecology"]. Petrozavodsk, 2012. P. 89–91.
14. Slukovsky Z. I., Rybakov D. S., Bubnova T. P. A particle-size distribution of bottom sediments of the small urban Neglinka River (Petrozavodsk) [Granulometricheskiy sostav donnykh otlozheniy gorodskoy chasti maloy reki Neglinki (Petrozavodsk)]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and useful minerals of Karelia]. Petrozavodsk, 2013. Is. 15. P. 168–172.
15. Guide to geochemistry [*Spravochnik po geokhimii*]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 479 p.
16. Sushchuk A. A., Gruzdeva L. I. Effect of anthropogenic pollution of Karelian industrial centres on soil nematode communities [Vliyanie tehnogennogo zagryazneniya promyshlennykh tsentrov Karelii na soobshchestva pochvennykh nematod]. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo [Journal Penza State pedagogical university]*. 2011. № 25. P. 445–452.
17. Yanin E. P. Specific granulometric composition of fluvial deposits of a small river in the zone affected by an industrial town [Osobennosti granulometricheskogo sostava ruslovykh otlozheniy maloy reki v zone vliyaniya promyshlennogo goroda]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of the higher educational institutions. Geology and Exploration]. 2009. № 3. P. 69–74.
18. Skorbiłowicz E., Skorbiłowicz M. Metals in grain fractions of bottom sediments from selected rivers in northeastern Poland // Physics and Chemistry of the Earth. 2011. № 36. P. 567–578.
19. Songa Y., Ji J., Yang Z., Yuan X., Mao Ch., Frost R. L., Ayoko G. A. Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River // Catena. 2011. № 85. P. 73–81.
20. Taylor M. P. Distribution and storage of sediment-associated heavy metals downstream of the remediated Rum Jungle Mine on the East Branch of the Finniss River, Northen Territory, Australia // Journal of Geochemical Exploration. 2007. № 92. P. 55–72.

Поступила в редакцию 05.02.2013

Июнь, № 4 **Сельскохозяйственные науки** **2013**

УДК 636.22/.28.082

АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
bolg@psu.karelia.ru

МИХАИЛ ПАВЛОВИЧ КОНОВАЛОВ
аспирант кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
smiwanja@mail.ru

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ГРИШИНА
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
grishina@psu.karelia.ru

VARIABILITY & HEREDITY OF BREEDING VALUE INDEX OF AYRSHIRE AND HOLSTEIN BULLS IN FINLAND*

To define the breeding value of bulls, whose parameters in different populations require further research, is the main problem in dairy cattle selection. The aim of our work was to study the variability and inheritance of breeding value index of bulls defined by the BLUP method. We used the information on the breeding value index of 2559 bulls of Ayrshire and Friesian (Holstein) Finnish breeds for the years 1995–2006. High variability of a breeding value index of Ayrshire bulls was revealed; their index mark varied from 26,8 to –28,6 points, while the average rate in the division was 3,9 ± 0,3 points. The best group of bulls, with the breeding value equal to 12 points and more, made up –28,6 %. The share of leader bulls with very high breeding value (24 points and more) was 3,1 %. On the whole, neutral bulls and improver-bulls amounted to 64,1 %, degrader-bulls – 35,9 %. To valuate the inheritance of breeding value index we used father groups and the calculation of correlation coefficient in father-son line. We found the inherited father's influence on their sons; the correlation coefficient of Ayrshire bulls was 0,263 (P < 0,001), Holstein – 0,446 (P < 0,001). However, the increase of father's breeding value from 15 to 36 points and more, in a group of improver-bulls of both breeds, did not cause higher breeding value of their sons, which stayed at about the same level – in the limits of 5–8 points. Therefore, high breeding value of a bull does not guarantee the same breeding value of its son. That is why each steer, received even from its relatives with very valuable genotype, should be evaluated according to its offspring value by estimating its personal breeding value.

Key words: selection, breeding value, Ayrshire breed, Holstein breed, dairy cattle

INTRODUCTION

To define and raise genetic value of animals is the main problem in dairy cattle selection. Meanwhile the direct qualification of animal's genetic value is not possible yet [5]. But it is predicted with the help of phenotype of the animal's parents or/and the animal itself or/and its offspring by defining breeding value and calculating selection indexes [5]. For this purpose BLUP (Best Linear Unbiased Predictor) [1], [2], [4], [6], and BLUP AM (BLUP for Animal Model) [1], [2], [4] methods are admitted as the most effective.

Defining the breeding value of bulls with the BLUP method is widely used in selection programs of dairy cattle in many countries of the world. It is bulls' selection for their higher breeding value that caused a substantial progress in dairy productivity of cows in the counties of Europe and Northern America (up to 8500–9500 kg of milk per lactation period). Meanwhile, variability, inheritance and the ways of higher grades of breeding value of bulls in different populations need further analysis [5], which predetermined the purpose of our work. The aim of the work was to study the variability and inherited breeding value index of bulls.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH WORK

We used the information on the results of the BLUP method valuation of offspring quality and breeding value of 2559 Ayrshire and Friesian (Holstein) Finnish bulls covering the years 1995–2006 [3]. The Ayrshire is the leading dairy breed in Finland. According to the data of 2005, its share was 70,1 % of a controlled herd or 171,4 thousand dairy cows (the largest population of the Ayrshire breed in the world). The share of Friesian (Holstein) and Finnish breed was 28,8 % and 1,1 % accordingly.

The Finnish Ayrshire cows are able to produce high-quality milk rich in protein and fat. In 2005, the productivity of controlled Ayrshire cows was 8274 kg of milk with protein content equal to 3,44 % and fat content 4,31 %.

To define breeding value of bulls the BLUP method is used, which is constantly improved. The total breeding value is expressed in points and is qualified with the index of productivity, fertility, health, and udder texture of daughters. The total protein output per lactation is assumed as the main selection trait.

In Finland, many other traits are evaluated to have additional information. After the breeding value has been qualified, the bulls are divided into following groups: the best, whose breeding value is 12 points and more (suitable for breeding); improvers, whose breeding value is more than zero point and degraders with the breeding value lower than zero point.

In our work to valuate the variability of breeding value index, the bulls were divided according to their index grade. To valuate the inheritance degree of breeding value we used the method of grouping fathers and correlation in father-son line. Pearson's correlation coefficient is calculated based on an Excel spreadsheet. The scale of grades in points (in the figures and tables) is calculated on the Basis of the difference between the maximum and minimum values for the sample points divided by the number of groups (grades).

RESEARCH WORK RESULTS AND DISCUSSION

The division of evaluated Ayrshire bulls according to breeding value is shown in table 1. In the whole division, the breeding value of Ayrshire bulls has positive evaluation points (3,9 ± 0,3). This proves that they are breed improvers. 64,1 % of bulls have breeding value equal to zero and more points. 28,6 % of these bulls refer to the best group of bulls whose breeding value is 12 and more points. The share of leader bulls with breeding value of 24 points and more is 3,1 %. The degrader bulls make 35,9 %. These data illustrate high variability of breeding value index of the bulls. Its grade varies within the range from 26,8 to –28,6 points.

Table 1

The division of Ayrshire bulls according to their breeding value (1995–2006)

Gradations in breeding value, points	n	%	x ± m
–25 and less	20	1,1	–28,6 ± 0,9
from –24 to –13	125	6,9	–16,6 ± 0,3
from –12 to –1	507	27,9	–5,5 ± 0,1
from 0 to 11	647	35,5	5,3 ± 0,1
from 12 to 23	463	25,5	16,2 ± 0,1
24 and more	56	3,1	26,8 ± 0,4
in the whole division	1818	100,0	3,9 ± 0,3

The average breeding value grade for Holstein bulls was also positive in the whole division (3,5 ± 0,4). The bulls of breeding value from 0 and more amounted to 62,5 %. The best group of bulls from these, with breeding value equal to 12 points and more amounted to 26,6 %. The share of degrader bulls made 37,5 %.

The average breeding value of the best qualified bulls (12 points and more) of Ayrshire and Friesian (Holstein) breeds was practically similar and made 17,7 ± 0,2 and 17,2 ± 0,4 points accordingly. The division of their breeding value expressed in points is given in aig. 1.

The most part of the bull herd has the breeding value from 12 to 19 points. Their share in Ayrshire and Holstein breed made 72 and 74 % accordingly. The share of the best-qualified leader-bulls (28 points and more) was 2,6 and 4,0 % accordingly.

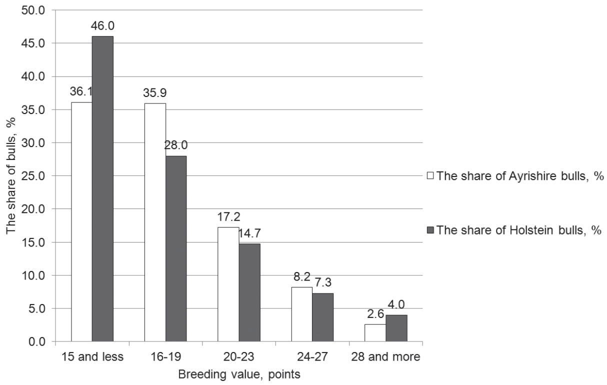


Fig. 1. The distribution of the best-qualified Ayrshire and Holstein bulls according to their breeding value (12 points and more) in Finland

Therefore, the BLUP estimation determines similar distribution of two different bull breeds in accordance with their breeding value.

In order to study the inheritance degree of breeding value the bulls were divided into father-son pairs. The father's influence on their sons was tested with the method of grouping and calculation of correlation index. Table 2 shows information on the influence of breeding value of Ayrshire father-bulls on the breeding value of their sons in the whole division.

It is found that bulls inherit the breeding value, although father-son correlation index in the whole division is not high and it is equal to 0,263 ($P < 0,001$). We should note the specific features of fathers' hereditary influence connected with their breeding value level. In particular, the *degrader bulls* (with negative marks) gave offspring of *degrader sons* as well. Moreover, while negative qualification grade of fathers' breeding value became lower, their sons showed lower negative qualification marks as well. It is with the decreased qualification grade of fathers from –30,4 to –12,9 that the grade of their sons decreased from –18,2 to –2,2. The bulls, close to neutral breeding status (0,3), produced their sons with nearly the same specific feature (1,2). Moreover, the

Table 2

The breeding value influence of Ayrshire father-bulls on their sons' breeding value (the whole division)

Gradations in breeding value of fathers, points	n	Fathers x ± m	Sons x ± m	x ± m
-22 and less	15	-30,4 ± 1,3	-18,5 ± 2,5***	0,131 ± 0,275
from -21 to -9	13	-12,9 ± 0,6	-2,2 ± 4,0*	0,147 ± 0,298
from -8 to 4	90	0,3 ± 0,3	1,2 ± 1,0	0,373 ± 0,099***
from 5 to 17	183	14,8 ± 0,2	6,0 ± 0,7***	0,234 ± 0,072**
from 18 to 30	531	23,7 ± 0,1	6,6 ± 0,5***	0,012 ± 0,043
31 and more	141	34,4 ± 1,4	5,4 ± 0,8***	0,002 ± 0,085
in the whole division	973	20,1 ± 0,4	5,3 ± 0,3***	0,263 ± 0,031***

Notes. * P < 0,05; ** P < 0,01; *** P < 0,001.

hereditary influence of fathers on their sons was the highest in comparison with father groups of another breeding status, for father-son correlation index was the highest here (0,373 P < 0,001). What concerns *improver-bulls*, the growth of father's breeding value (from 14,8 to 34,4 points) did not result in higher breeding value of their sons. It kept nearly the same level – from 5,4 to 6,6 points. We have reason to speak about regression, which is marked by the fact that the most valued improver-bulls do not always produce their sons of the most valuable breed. This fact is also proved by the absence of father-son correlation connection in two gradation groups with the highest breeding value of fathers (r = 0,012; 0,002).

Nearly the same inheritance character of breeding value was found in the tested population of Holstein bulls (495 father-son pairs) but with specific feature – hereditary influence of fathers was on the whole significantly higher (r = 0,446 ± 0,040; P < 0,001), than the one in the Ayrshire breed.

Specific feature found in the Ayrshire bulls was proved: the degrader-fathers gave mainly degrader-sons, while neutral bulls, as a rule, reproduced their breeding status in their son's progeny. The process of regression appeared in this population as well: while father's breeding value grade grew from 10,6 to 34,8 points, the son's grade did not practically change and it was limited within 4,8 to 7,6 points.

Nevertheless, the materials on both bull populations really show that the sons of father-improvers inherit their breeding qualities, they are also improvers, although not as highly qualified as their fathers are.

These results are proved by the data of other research workers. The higher were the father-bulls evaluated, the better was the average index of their sons, and the more was the percentage of improvers among them (A. Ermilov, 1986) (citing from [4; 87]).

In addition to the above mentioned analysis covering the whole bull population, we have studied the inherited character of breeding value of bulls from the best part of population recommended for breeding practice (12 points and more).

The degree of inherit influence of Ayrshire breed fathers in this division was significantly lower than the one in the whole population (fig. 2). While the breeding value of fathers grew from 16,7 to 36,2 points, this index of their sons significantly lowered from 7,7 to 5,4 points (P < 0,005).

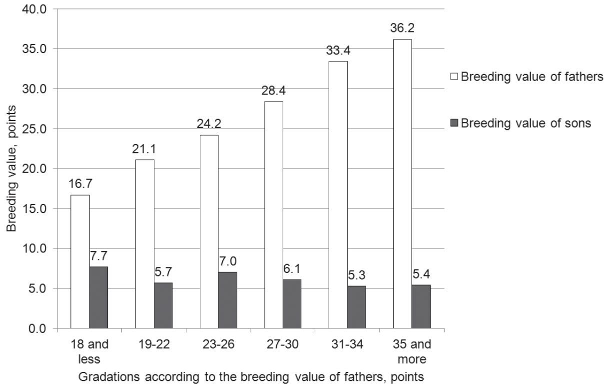


Fig. 2. The breeding value of fathers and sons of the Ayrshire breed (father-improvers with breeding value of 12 points and more)

The calculated correlation indexes in father-son pairs prove these specific traits. In particular, the relation in the division was practically absent (–0,042 < 0,035); in some bull gradations, it was of contradictory character (from –0,226 < 0,104 to 0,367 < 0,132).

The same specific features were found for the Holstein breed bulls (fig. 3). While the breeding value of fathers grew from 14,9 to 41,1 points, this index of their sons did not grow. It varied in different gradations within 4,0 and 12,1 points. The father-son correlation link was absent both in all separate taken gradations and in the whole division (–0,014 ± 0,065).

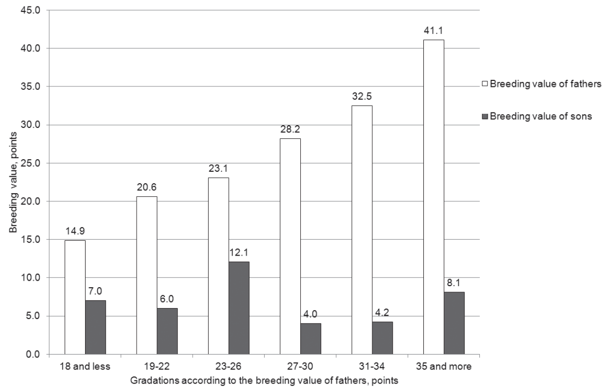


Fig. 3. The breeding value of fathers and sons of Holstein bulls (father-improvers with breeding value of 12 points and more)

These materials show that high breeding value of a bull does not guarantee the same high breeding value of its son, which should be tested complexly and be qualified to prove factual breeding data.

Further progress of Ayrshire breed is possible if we use every new bull generation of better breeding values than the previous generation. It assumes the necessity to estimate every young bull, even an offspring of its relatives with very valuable genotype.

CONCLUSION

Our research work showed that preliminary selection in father line raises average breeding value of their sons, but it does not always guarantee effective improvers in the next generation. Perhaps these deviations are caused by plenty of characteristics included in the complex index – productivity index, exterior, udder texture, health and others [7] has the same opinion. To provide genetic progress in a herd it is not enough to import world-level leader bulls from abroad or to use imported sperm of these leaders. In any case, it is necessary to evaluate young bulls in their offspring quality to select the best. Only the valuation of offspring quality can show highly valuable sires.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

Bolgov A. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Konovalov M. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Grishina N. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

VARIABILITY & HEREDITY OF BREEDING VALUE INDEX OF AYRSHIRE AND HOLSTEIN BULLS IN FINLAND

To define the breeding value of bulls, whose parameters in different populations require further research, is the main problem in dairy cattle selection. The aim of our work was to study the variability and inheritance of breeding value index of bulls defined by the BLUP method. We used the information on the breeding value index of 2559 bulls of Ayrshire and Friesian (Holstein) Finnish breeds for the years 1995–2006. High variability of a breeding value index of Ayrshire bulls was revealed; their index mark varied from 26,8 to –28,6 points, while the average rate in the division was 3,9 ± 0,3 points. The best group of bulls, with the breeding value equal to 12 points and more, made up –28,6 %. The share of leader bulls with very high breeding value (24 points and more) was 3,1 %. On the whole, neutral bulls and improver-bulls amounted to 64,1 %, degrader-bulls – 35,9 %. To valuate the inheritance of breeding value index we used father groups and the calculation of correlation coefficient in father-son line. We found the inherited father's influence on their sons; the correlation coefficient of Ayrshire bulls was 0,263 ($P < 0,001$), Holstein – 0,446 ($P < 0,001$). However, the increase of father's breeding value from 15 to 36 points and more, in a group of improver-bulls of both breeds, did not cause higher breeding value of their sons, which stayed at about the same level – in the limits of 5–8 points. Therefore, high breeding value of a bull does not guarantee the same breeding value of its son. That is why each steer, received even from its relatives with very valuable genotype, should be evaluated according to its offspring value by estimating its personal breeding value.

Key words: selection, breeding value, Ayrshire breed, Holstein breed, dairy cattle

REFERENCES

1. B e r g e r P. J. Notes on Linear Model Theory BLUP and Example of Mixed Model Animal Prediction Methodology // Anim. Sci. 1993. 652. Iowa Univ.
2. H e n d e r s o n C. R. Application of Linear Models in Animal Breeding. University of Guelph, 1984. P. 462.
3. Journal Nauta // Nautalehti, FABA, Finland. 1995–2006.
4. K u z n e t s o v V. M. *Metody plemennoy otsenki zhivotnykh c vvedeniem v teoriyu BLUP* [Methods of Animal Breeding Valuation and Introduction into the Theory of BLUP]. Kirov, Zonal North-Eastern Scientific-Research Institute of Agriculture, 2003. P. 358.
5. K u z n e t s o v V. M. Methods of Animal Valuation in Order of Parental Influence: Innovation or Stagnation? [Metod otsenki zhivotnykh po stepeni roditel'skogo vliyaniya: innovatsiya ili stagnastiya?]. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* [Biological Problems of Productive Animals]. 2012. № 3. P. 89–115.
6. K u z n e t s o v V. M., S h c h e s t i p e r o v A. A., E g o r o v a V. N. *Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu metoda BLUP dlya otsenki plemennoy tsennosti bykov-proizvoditeley* [Methodical Recommendations on the Use of BLUP Method to Evaluate the Breeding Value of Sire Bulls]. Leningrad, VNIIRGZH Publ., 1987. P. 69.
7. S u l l e r I. L. *Selektsiya krupnogo rogatogo skota molochnykh porod* [Selection of Dairy Cattle: Educational Guidance]. St. Petersburg, Prospekt nauki Publ., 2012. 128 p.

Поступила в редакцию 07.04.2013

Июнь, № 4 **Сельскохозяйственные науки** **2013**

УДК 332.145

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ ИВАНОВ
кандидат экономических наук, доцент кафедры землеустройства факультета землеустройства, Государственный университет по землеустройству (Москва, Российская Федерация)
nickibut@yandex.ru

ЛЮБОВЬ ПАВЛОВНА ЕВСТРАТОВА
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
levstratova@yandex.ru

ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА НИКОЛАЕВА
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ln21@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ*

В связи с проведением земельной реформы в России произошли коренные изменения в перераспределении земель, структуре землевладений и землепользований. Среди производителей товарной продукции до сих пор лидирующее положение занимают крупные сельхозпредприятия. Цель настоящей работы – на примере Белгородской области провести анализ эффективности использования пахотных земель в крупных агропромышленных предприятиях. Территория Белгородской области, включающая 21 муниципальный район, с учетом агроклиматического районирования разделена на 3 агроклиматических района. Эффективность использования пахотных земель оценивали по некоторым факториальным и результативным показателям в пределах каждого агроклиматического района. С привлечением методов многомерного статистического анализа (иерархического факторного, кластерного и пошагового дискриминантного) проведена сравнительная оценка использования пахотных земель сельскохозяйственных организаций. По результатам анализа выделен северо-западный агроклиматический район, характеризующийся повышенными показателями увлажнения и плодородия почв. Здесь получены наибольшие значения урожайности и валового выхода продукции зерновых, сахарной свеклы и подсолнечника, а также высокие показатели издержек производства продукции растениеводства. Установлены однонаправленные изменения изученных показателей: общей площади организации, общей посевной площади, площадей, занятых под зерновые, подсолнечник, сахарную свеклу, а также выхода валовой продукции в стоимостном выражении. Более полное использование сельскохозяйственных угодий, в частности пашни, выявлено в организациях с высокой кадастровой стоимостью сельскохозяйственных земель. Таким образом, на примере Белгородской области показано, что в относительно благоприятных почвенно-климатических условиях для получения продукции растениеводства эффективность сельскохозяйственного землепользования преимущественно определяется организационно-экономическими ресурсами.

Ключевые слова: использование земель, агроклиматические районы, многомерный статистический анализ

Использование земель в административно-территориальном образовании осуществляется в границах землевладений и землепользований, закрепленных за субъектами права. Среди них, имеющих земли сельскохозяйственного назначения, выделены основные производители товарной продукции: группа организаций, включающая общества с ограниченной ответственностью, аграрные кооперативы, государственные и муниципальные унитарные сельскохозяйственные предприятия, акционерные общества, научно-исследовательские и учебные учреждения. С проведением земельной реформы в России произошли коренные изменения в перераспределении земель, структуре землевладений и землепользований, экономике землеустройства. Так, например, в Белгородской области, по данным [2], [5], при реорганизации и приватизации аграрных предприятий около 70 % сельскохозяйственных угодий передано в собственность юридических и физических лиц. Количество государственных унитарных сельскохозяйственных предприятий сократилось в десятки раз, а их площади – с 1984,5 тыс. га до 6,7 тыс. га. Основными землепользователями стали хозяйственные товарищества и общества (1425,0 тыс. га), а также производственные кооперативы, организации государственного сектора, подсобные хозяйства (171,0 тыс. га), площадь которых составила 12 % от общей площади сельскохозяйственных землепользований. Между тем в частном секторе выявлена тенденция увеличения в 2,3 раза числа граждан (до 2,8 млн), занимающихся сельскохозяйственным производством, их деятельность развернута на площади 360,5 тыс. га.

Цель настоящей работы – на примере Белгородской области провести анализ эффективности использования пахотных земель в крупных агропромышленных предприятиях для подготовки и принятия управленческих решений.

Территория этой области с учетом агроклиматического районирования разделена на три агроклиматических района [1]. Первый район (северо-западный), включающий десять муниципальных районов (Белгородский, Борисовский, Грайворонский, Губкинский, Ивнянский, Корочанский, Краснояружский, Прохоровский, Ракитянский, Яковлевский), характеризуется повышенными показателями увлажнения и плодородия почв. Площадь сельскохозяйственных предприятий данного агроклиматического района составляет 632,4 тыс. га, или 39,7 % от общей площади сельскохозяйственных организаций области. Второй район (центральный) представлен шестью муниципальными районами (Красненский, Красногвардейский, Новооскольский, Старооскольский, Чернянский, Шебекинский). В отличие от северо-западного района, здесь установлены более низкие значения влажности и уровня плодородия почв. На долю сельскохозяйственных предприятий приходится 476,7 тыс. га, или 30,0 % от общей площади сельскохозяйственных организаций области. Третий район (юго-восточный), объединяющий пять муниципальных районов (Алексеевский, Валуйский, Вейделевский, Волоконовский, Ровеньский), выделяется неустойчивостью увлажнения, частыми засухами, суховеями и максимальной теплообеспеченностью растений. В этом районе расположены сельскохозяйственные организации на площади 481,9 тыс. га, или 30,3 %.

В исследованиях обобщены статистические данные результативности возделывания отдельных полевых культур в сельскохозяйственных организациях 21 муниципального района Белгородской области (2008–2010 годы) по ряду показателей: общая площадь хозяйства (тыс. га), посевные площади (тыс. га) под зерновыми, подсолнечником, сахарной свеклой, урожайность этих культур (т/га), число работников из расчета на 100 га общей площади, стоимость основных производственных фондов (тыс. руб. / 100 га), денежно-материальные затраты на получение продукции (тыс. руб. / 100 га), кадастровая стоимость сельскохозяйственных угодий (тыс. руб. / га), стоимость валовой продукции (млн руб.), ежегодный чистый доход от производства (тыс. руб. / 100 га) и др. [5].

Эффективность использования пахотных земель оценивали по некоторым факториальным и результативным показателям в пределах каждого агроклиматического района. Дополнительно проводили математическую обработку многочисленного цифрового материала с использованием сочетания методов многомерного статистического анализа [3], [4], реализованных в пакете программы STATISTICA. Применение факторного иерархического анализа обеспечило группировку муниципальных районов (объектов) в факторном пространстве и более корректную оценку структуры взаимосвязей между изученными показателями (переменными). С привлечением кластерного анализа (метод Варде, Евклидово расстояние) эту группировку уточнили и дали характеристику выделенным группам районов по отдельным экономическим составляющим, а с помощью пошагового дискриминантного анализа подтвердили корректность подобной классификации и установили переменные-дискриминаторы, достоверно разделяющие объекты на группы.

По итогам анализа факториальных и результативных данных (табл. 1, 2) выделен северо-западный агроклиматический район с наибольшими значениями представленных показателей. Здесь получены максимальные уровни урожайности выращиваемых полевых культур и валового выхода продукции. Так, например, урожайность зерновых варьировала от 2,9 до 4,4 т/га, а валовое производство изменялось в пределах 110…235 тыс. т / 100 га пашни. На фоне этого выявлены высокие показатели издержек производства продукции растениеводства (45,1…68,9 тыс. руб. / 100 га сельскохозяйственных угодий).

Центральный агроклиматический район отличался более низкими значениями урожайности, валовой продукции и издержек произ-

Таблица 1

Факториальные показатели использования сельскохозяйственных земель

Агроклиматический район	Общая площадь хозяйств, тыс. га	Удельный вес пашни в структуре сельскохозяйственных угодий, %	Посевная площадь, тыс. га	Балл бонитета пашни	Стоимость основных фондов на 100 га сельскохозяйственных угодий, млн руб.
Северо-западный (I)	632,4	84,2	563,4	72,7	1263
Центральный (II)	476,7	82,2	383,4	67,5	1065
Юго-восточный (III)	481,9	75,6	401,4	64,1	639

Таблица 2

Результативные показатели использования сельскохозяйственных земель

Агроклиматический район	Урожайность, т/га			Валовое производство, тыс. т / 100 га пашни			Издержки производства на 100 га сельскохозяйственных угодий, тыс. руб.
	зерновые	подсолнечник	сахарная свекла	зерновые	подсолнечник	сахарная свекла	
Северо-западный (I)	3,8	2,1	36,1	172,2	18,7	259,7	59,6
Центральный (II)	2,5	1,8	34,0	107,6	6,7	153,0	45,8
Юго-восточный (III)	2,9	1,9	32,1	84,0	8,5	156,0	50,4

водства. Показатели урожайности зерновых культур составили 2,1…3,0 т/га, валового сбора – 65,5…160,4 тыс. т / 100 га пашни. Издержки на производство зерна злаковых зерновых культур, семян подсолнечника и корнеплодов сахарной свеклы достигали 39,2…49,8 тыс. руб.

В юго-восточном агроклиматическом районе данные урожайности ниже среднего уровня (зерновые – от 2,2 до 3,9 т/га), валовой продукции (81,1…178,2 тыс. т / 100 га пашни). При этом издержки производства продукции растениеводства оказались невысокими (37,7…51,2 тыс. руб.).

По результатам обработки данных с использованием иерархического факторного анализа установлены три косоугольных фактора первого порядка F_1… F_3, для некоторых из них определены корреляционные связи (коэффициенты корреляции получены между F_1 и F_2 (0,57), F_2 и F_3 (–0,38)). Наличие этих связей обусловило возможность выделения из матрицы взаимокорреляций F_1… F_3 одного некоррелирующего (независимого) фактора второго порядка $Ф_1$. Факторные нагрузки последнего, отражающие структуру взаимосвязей между изученными переменными, свидетельствовали об однонаправленном изменении показателей: общей площади организации (факторная нагрузка на эту переменную составила 0,73), общей посевной площади (0,81), площадей, занятых под зерновые (0,72), подсолнечник (0,65), сахарную свеклу (0,59), а также выхода валовой продукции в стоимостном выражении (0,52).

С помощью факторного иерархического (рис. 1) и кластерного (рис. 2) анализов по однородности изученных показателей выделены четыре группы районов. Районы первой группы (Белгородский, Шебекинский, Старооскольский, Чернянский, Корочанский, Новооскольский, Валуйский, Красногвардейский, Ровеньский) отличались минимальными средними значениями урожайности зерновых культур (2,9 т/га), подсолнечника (1,5 т/га), кадастровой стоимости сельскохозяйственных угодий (35,0 тыс. руб. / га) на фоне максимального ежегодного чистого дохода от сельскохозяйственного производства (88,6 тыс. руб. / 100 га). Вторая группа, включающая Борисовский, Грайворонский, Ивнянский, Краснояружский, Красненский районы, выделилась наименьшими показателями общей площади предприятий (43,3 тыс. га), общей посевной площади (36,7 тыс. га) и площади, занятой под зерновые (17,9 тыс. га), урожайности сахарной свеклы (25,2 т/га), валовой продукции в стоимостном выражении (281,9 млн руб.) и, наоборот, наибольшими – числа работников (7), занятых в сельскохозяйственном производстве на 100 га общей площади хозяйства, и урожайности подсолнечника (1,6 т/га).

Два муниципальных района (Яковлевский и Ракитянский) из северо-западного агроклиматического района (третья группа) сочетали высокие значения урожайности зерновых культур (3,8 т/га), сахарной свеклы (38,8 т/га), денежно-материальных затрат на производство сельскохозяйственной продукции (7895,4 тыс. руб. / 100 га), кадастровой стоимости сельскохозяйственных угодий (48,4 тыс. руб. / га) и стоимости основных производственных фондов (1535,4 тыс. руб. / 100 га) с наименьшими по-

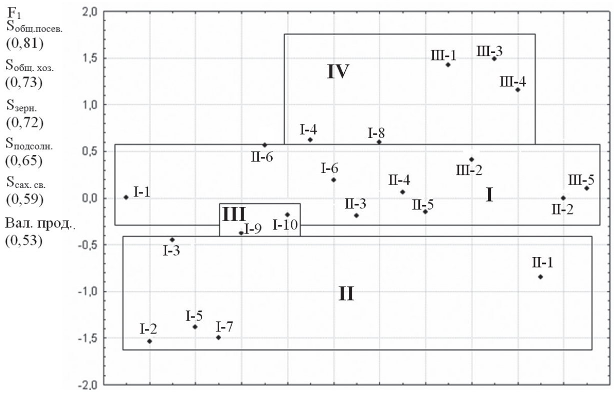
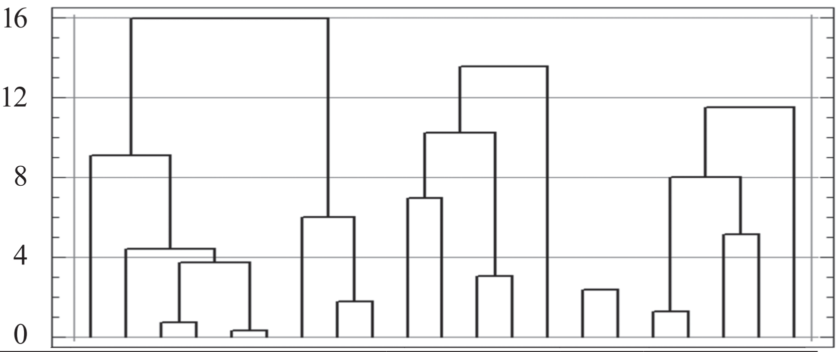


Рис. 1. Расположение муниципальных районов Белгородской области в факторном пространстве по отдельным экономическим показателям возделывания полевых культур: $S_{общ.\ посев.}$ – общая посевная площадь, $S_{общ.\ хоз.}$ – общая площадь хозяйства, $S_{зерн.}$, $S_{подсолн.}$ $S_{сах.\ св.}$ – площадь под зерновыми, подсолнечником и сахарной свеклой соответственно, вал. прод.– валовая продукция в стоимостном выражении. Агроклиматические районы: I – северо-западный (1 – Белгородский, 2 – Борисовский, 3 – Грайворонский, 4 – Губкинский, 5 – Ивнянский, 6 – Корочанский, 7 – Краснояружский, 8 – Прохоровский, 9 – Ракитянский, 10 – Яковлевский); II – центральный (1 – Красненский, 2 – Красногвардейский, 3 – Новооскольский, 4 – Старооскольский, 5 – Чернянский, 6 – Шебекинский); III – юго-восточный (1 – Алексеевский, 2 – Валуйский, 3 – Вейделевский, 4 – Волоконовский, 5 – Ровеньский)



Показатель	I-1, I-6, II-3, II-5, II-4, II-2, II-6, III-2, III-5	I-2, II-1, I-3, I-5, I-7	I-9, I-10	I-4, I-8, III-3, III-4, III-1
	Кластер			
	I	II	III	IV
Общая площадь хозяйства, тыс. га	88,0	43,3	58,8	93,0
Общая посевная площадь, тыс. га	67,1	36,7	59,7	88,4
Площадь посева зерновых, тыс. га	28,6	17,9	32,6	35,5
Площадь посева подсолнечника, тыс. га	6,1	2,3	2,1	7,5
Площадь посева сахарной свеклы, тыс. га	2,9	1,8	1,5	5,9
Урожайность зерновых, т/га	2,9	3,5	3,8	3,0
Урожайность подсолнечника, т/га	1,5	1,6	1,6	1,6
Урожайность сахарной свеклы, т/га	33,2	25,2	38,8	37,0
Число работников, занятых в сельскохозяйственном производстве на 100 га общей площади хозяйства	6	7	6	3
Стоимость основных производственных фондов, тыс. руб. / 100 га	916,0	1284,5	1535,4	752,8
Денежно-материальные затраты на получение продукции, тыс. руб. / 100 га	3672,1	4269,5	7895,4	2472,2
Кадастровая стоимость сельскохозяйственных угодий, тыс. руб. / га	35,0	40,3	48,4	42,2
Стоимость валовой продукции растениеводства, млн руб.	363,0	281,9	405,4	531,1
Ежегодный чистый доход от производства, тыс. руб. / 100 га	88,6	–43,0	–277,3	69,4

Рис. 2. Дендрограмма группировки муниципальных районов Белгородской области по отдельным экономическим показателям возделывания полевых культур

казателями посевной площади подсолнечника (2,1 тыс. га), сахарной свеклы (1,5 тыс. га) и ежегодного чистого дохода от сельскохозяйственного производства (–277,3 тыс. руб. / 100 га).

Четвертая группа районов (Губкинский и Прохоровский, Алексеевский, Вейделевский и Волоконовский) характеризовалась максимальными показателями площади организации (93,0 тыс. га), общей посевной площади (88,4 тыс. га), площади посева зерновых культур (35,5 тыс. га), подсолнечника (7,5 тыс. га), сахарной свеклы (5,9 тыс. га), валовой продукции сельскохозяйственного производства (531,1 млн руб.) и минимальными – денежно-материальных затрат на производство продукции растениеводства (2472,2 тыс. руб. / 100 га), стоимости основных производственных фондов (752,8 тыс. руб. / 100 га) и числа работников (3), занятых в производстве на 100 га общей площади хозяйства.

Результаты пошагового дискриминантного анализа подтвердили стопроцентную корректность вышепредставленной группировки муниципальных районов. Основными дискриминаторами, достоверно разделяющими их на группы, явились общая и посевная площади предприятия.

В целом наибольшее число районов, занимающих центральную часть Белгородской области, характеризовались преимущественно средними значениями отдельных экономических показателей. В большинстве муниципальных районов северо-запада территории на фоне наименьших площадей (общей и посевной) отмечены колебания урожайности полевых культур и убыточное производство продукции растениеводства. Однако в относительно благоприятных условиях этой зоны валовое производство выращиваемых культур, отражающее эффективность использования земельных ресурсов, значительно выше по сравнению с хозяйствами других районов. Существенные резервы для развития сельскохозяйственного производства выявлены в Борисовском и Ивнянском районах. В юго-восточном районе превышение среднего значения валового производства продукции растениеводства по области установлено лишь в Вейделевском и Волоконовском районах.

Более полное использование сельскохозяйственных угодий, в частности пашни, выявлено в организациях с высокой кадастровой стоимостью сельскохозяйственных земель. Так, удельный вес посевных площадей в общей площади пашни сельскохозяйственных организаций Ракитянского, Грайворонского, Краснояружского, Яковлевского, Губкинского и Прохоровского районов составлял более 80% при кадастровой стоимости более 40 тыс. руб. / га.

Таким образом, показано, что в относительно благоприятных почвенно-климатических условиях для получения продукции растениеводства эффективность сельскохозяйственного землепользования преимущественно определяется организационно-экономическими ресурсами.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Г. Н., Волошенко И. В. Агроклиматическое районирование территории Белгородской области / Белгородский государственный университет. Белгород, 2010. С. 27–31.
2. Доклад о состоянии и использовании земель Белгородской области за 2009 год / Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Белгородской области. Белгород, 2010. 131 с.
3. Ким Дж.-О., Мьюллер П. У., Клекка У. Р., Олedендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансовая статистика, 1989. 215 с.
4. Факторный анализ (подход с использованием ЭВМ): Методическое пособие / Сост. В. Н. Харин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 190 с.
5. Центральная база статистических данных / Федеральная служба государственной статистики, 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm

Ivanov N. I., State University of Land Use Planning (Moscow, Russian Federation)
Yevstratova L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Nikolaeva E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

EFFICIENCY OF USING ARABLE LANDS IN AGRICULTURAL ENTERPRISE

With introduction of land reforms in Russia radical changes in the area of rearrangement, construction, and land use occurred . Large agricultural enterprises still share the first place among users of commercial products. The purpose of the present work is to conduct evaluation of efficiency of arable lands' usage in large farming firms on the example of Belgorod oblast. The territory of Belgorod oblast, which includes 21 municipal regions, is divided into 3 agro-climatic regions according to agro-climatic zonation. The efficiency of using arable lands was evaluated by several factorial and effective criteria within every agro-climatic region. Using methods of multiple statistic evaluation (hierarchic-factorial, cluster and incremental discriminate), a comparative estimation of arable lands' usage in farming firms was carried out. According to the results of the conducted evaluation, the northwest agro-climatic region is characterized by favorable conditions and soil capabilities. The highest crop yield was received as well as the crops of white beets, and sunflowers. The unidirectional changes in studied criteria were established: general area of organization, general sowing area, areas taken for crops, sunflowers, white beets, and gross output in value measures. Agricultural lands wtre used in full scale, including tillable lands, which were discovered in organizations with high cadastral value of arable lands. Therefore, on the example of Belgorod it was proven that under prosperous soil-climatic conditions efficiency of using arable lands is primarily determined by economic organization resources.

Key words: use of lands, agroclimatic areas, the multidimensional statistical analysis

REFERENCES

1. Grigor'ev G. N., Voloshenko I. V. *Agroklimaticheskoe rayonirovanie territorii Belgorodskoy oblasti* [Agroclimatic Zoning on the Belgorod Oblast Territory]. Belgorod, 2010. P. 27–31.
2. *Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' Belgorodskoy oblasti za 2009 god* [The Report on the State and Use of the Belgorod oblast]. Belgorod, 2010. 131 p.
3. Kim Dzh.-O., M'uller P. U., Klekka U. R., Oledenderfer M. S., Bleshfild R. K. *Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz* [Factor, Discriminant, and Cluster Analysis]. Moscow, Finansovaya statistika Publ., 1989. 215 p.
4. *Faktornyy analiz (podkhod s ispol'zovaniem EVM)* [Factor Analysis (IBM approach)]. Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 1992. 190 p.
5. Central Statistics Database [Tsentral'naya baza statisticheskikh dannykh]. Available at: http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm

Поступила в редакцию 07.06.2013

Июнь, № 4 **Технические науки** **2013**

УДК 620.22

VALERIY MIKHAYLOVICH LEVIN
Doctor of Physics and Mathematics, Researcher, Mexican Oil Institute (Mexico City, Mexico)
vlevine@imp.mx

EXACT RELATIONS BETWEEN EFFECTIVE THERMOPOROELASTIC CHARACTERISTICS OF POROUS COMPOSITES

Exact relations between the effective thermoporoelastic constants of two-phase heterogeneous materials (cross-property relations) are developed by some simple way. For the composite materials with the isotropic components these relations are obtained in explicit form.

Key words: poroelastic composites, effective properties, cross-property relations

INTRODUCTION

One of the important problem of the mechanics of heterogeneous materials is the so-called homogenization problem whereby a heterogeneous material is replaced by a homogeneous one having the same response to the external loading; see the review article [9] and books [7], [10], [13]. An interesting aspect of the problem is that certain effective characteristics of the homogenized material may be interconnected (cross-property relations). The simplest cross-property relations are due to mathematical analogy between the equations that govern different phenomena: dielectric and magnetic permittivity, electric and thermal conductivity etc. In such cases, results for one of the properties imply similar results for the other one in a straightforward way. In some cases, however the cross-property relations are much less trivial. An example is provided by heat transfer in a fiber reinforced medium in direction normal to the fibers and shear deformation along the fibers (see Hashin [5], Chap. 5.5.1). A more complicated example was given by Hill [6] who derived expressions for the transversely isotropic elastic moduli of a composite material reinforced by parallel fibers. Hill [6] showed that only three of the five elastic constants are independent for such a material. Similar relations have been obtained by Schulgasser [15] for the effective elastic, piezoelectric and dielectric characteristics of transversely isotropic piezoelectric composites with continuous reinforcement.

There is another grope of relations in which the characteristics of different properties are interconnected. The relations between the effective thermal expansion coefficients and effective elastic moduli of two-phase isotropic composites were established by Levin [8] (see also Schapery, [14]) and generalized by Rosen and Hashin [12] to the case of anisotropic materials. Relations between the thermal expansion and piroelectric coefficients and electroelastic moduli of thermoelectroelastic composites were obtained by Dunn [4]. Here we suggest a simple way to obtain cross-property relations for two-phase thermoporoelastic composites. The poroelastic theory developed in the middle of the last century by Biot [2], [3] found a wide application in geomechanics for modeling of the static and dynamic behavior of real porous rocks filled with fluids. Such geological material are often highly inhomogeneous, containing the regions with different poroelastic properties (different fluids, for example, different porosity and skeleton rigidity). Thus, the obtained in this paper cross-property relations may be usefull for the solution of the homogenization problem for inhomogeneous (composite) poroelastic materials.

The linear constitutive relations for an arbitrary anisotropic poroelastic medium with incorporated thermal effects can be written in the form

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijkl}\varepsilon_{kl} - \alpha_{ij} p - \eta T, \\ \zeta &= \alpha_{ij}\varepsilon_{ij} + \beta p - \gamma T, \\ s &= \eta_{ij}\varepsilon_{ij} - \gamma p + cT, \end{aligned} \tag{1.1}$$

where ε_{ij} and σ_{ij} are the strain and stresses, p is the pore pressure, T is the temperature change from some reference temperature, C_{ijkl} is the tensor of the frame (solid skeleton) elastic moduli, α_{ij} is the tensor of the effective stress coefficients, η_{ij} is the tensor of the thermal stress coefficients, ζ is the pore strain, s is the entropy, c is the specific heat at the constant strain, β and γ are the Biot coefficients of thermoporoelastic coupling.

EFFECTIVE THERMOPOROELASTIC PROPERTIES OF TWO-PHASE COMPOSITES

We consider now a composite poroelastic material consisting of two homogeneous generally anisotropic components (phases) occupying the regions V_1, V_2 in some representative volume element V $(V = V_1 + V_2)$. Suppose that the temperature T and pore pressure p are constant in V. The constitutive relations for such a material can be written in the form

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(x) &= C_{ijkl}(x)\varepsilon_{kl}(x) - \alpha_{ij}(x)p - \eta_{ij}(x)T, \\ \zeta(x) &= \alpha_{ij}(x)\varepsilon_{ij}(x) + \beta(x)p - \gamma(x)T, \\ s(x) &= \eta_{ij}(x)\varepsilon_{ij}(x) - \gamma(x)p + c(x)T, \end{aligned} \tag{2.1}$$

where $x(x_1, x_2, x_3)$ is a point in 3D-space, $C_{ijkl}(x), \alpha_{ij}(x), \eta_{ij}(x), \beta(x), \gamma(x)$ and $c(x)$ are random functions of coordinates taking the constant values $C_{ijkl}^{(1)}, \alpha_{ij}^{(1)}, ..., c^{(1)}$ when $x \in V_1$ and $C_{ijkl}^{(2)}, \alpha_{ij}^{(2)}, ..., c^{(2)}$ when $x \in V_2$.

Let us introduce the characteristic function of the first phase $V_1(x)$

($V_1(x) = 1$ when $x \in V_1$, $V_1(x) = 0$ when $x \notin V_1$). Then, the functions $C_{ijkl}(x), \alpha_{ij}(x), \eta_{ij}(x)$ can be written as

$$\begin{aligned} C_{ijkl}(x) &= C_{ijkl}^{(2)} + \Delta C_{ijkl} V_1(x), \\ \alpha_{ij}(x) &= \alpha_{ij}^{(2)} + \Delta \alpha_{ij} V_1(x), \\ \eta_{ij}(x) &= \eta_{ij}^{(2)} + \Delta \eta_{ij} V_1(x), \end{aligned} \tag{2.2}$$

where

$$\begin{aligned} \Delta C_{ijkl} &= C_{ijkl}^{(1)} - C_{ijkl}^{(2)} \\ \Delta \alpha_{ij} &= \alpha_{ij}^{(1)} - \alpha_{ij}^{(2)} \\ \Delta \eta_{ij} &= \eta_{ij}^{(1)} - \eta_{ij}^{(2)} \end{aligned} \tag{2.3}$$

We denote the averaging operation over the volume V as $\langle \cdot \rangle$. After averaging Eqs. (2.1) and accounting (2.2), we obtain

$$\begin{aligned} &\langle \sigma_{ij}(x) \rangle = C_{ijkl}^{(2)} \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle + f_1 \Delta C_{ijkl} \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle_1 - \langle \alpha_{ij}(x) \rangle p - \langle \eta_{ij}(x) \rangle T, \\ &\langle \zeta(x) \rangle = \alpha_{kl}^{(2)} \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle + f_1 \Delta \alpha_{kl} \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle_1 + \langle \beta(x) \rangle p - \langle \gamma(x) \rangle T, \\ &\langle c \rangle = \eta_{kl}^{(2)} \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle + f_1 \Delta \eta_{kl} \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle_1 + \langle \gamma(x) \rangle p - \langle c(x) \rangle T. \end{aligned} \tag{2.4}$$

Here $\langle \cdot \rangle_1$ denotes the averaging over the region V_1, f_1 is the volume concentration of the first phase.

Due to linearity of the problem tensor $\langle \varepsilon_{ij}(x) \rangle_1$ has to be linear function of the average $\langle \varepsilon_{ij}(x) \rangle$, pore pressure p and temperature T

$$\langle \varepsilon_{ij}(x) \rangle_1 = Q_{ijkl} \langle \varepsilon_{ij}(x) \rangle + q_{ij} p + \kappa_{ij} T, \tag{2.5}$$

where Q_{ijkl}, q_{ij} and κ_{ij} are unknown quantities that are to be determined in some homogenization process.

Substituting relation (2.5) into (2.4) we have

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{ij}(x) \rangle &= C_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle - \alpha_{ij}^* p - \eta_{ij}^* T, \\ \langle \zeta(x) \rangle &= \alpha_{kl}^* \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle + \beta^* p - \gamma^* T, \\ \langle s(x) \rangle &= \eta_{kl}^* \langle \varepsilon_{kl}(x) \rangle - \gamma^* p + c^* T, \end{aligned} \tag{2.6}$$

where $C_{ijkl}^*, \alpha_{ij}^*, \eta_{ij}^*, \beta^*, \gamma^*$ and c^* are the effective thermoporoelastic characteristics of composite material (the quantities that connect the averaged over V fields, pore pressure and temperature). These characteristics are defined by the relations

$$C_{ijkl}^* = \langle C_{ijkl}(x) \rangle + f_1 \Delta C_{ijmn} \left(Q_{mnkl} - I_{mnkl} \right), \tag{2.7}$$

$$\alpha_{ij}^* = \langle \alpha_{ij}(x) \rangle + f_1 \Delta \alpha_{kl} \left(Q_{klij} - I_{klij} \right) = \langle \alpha_{ij}(x) \rangle - f_1 \Delta C_{ijkl} q_{kl}, \tag{2.8}$$

$$\eta_{ij}^* = \langle \eta_{ij}(x) \rangle + f_1 \Delta \eta_{kl} \left(Q_{klij} - I_{klij} \right) = \langle \eta_{ij}(x) \rangle - f_1 \Delta C_{ijkl} \kappa_{kl}, \tag{2.9}$$

$$\beta^* = \langle \beta(x) \rangle + f_1 \Delta \alpha_{ij} q_{ij}, \tag{2.10}$$

$$\gamma^* = \langle \gamma(x) \rangle - f_1 \Delta \alpha_{ij} \kappa_{ij} = \langle \gamma(x) \rangle - f_1 \Delta \eta_{ij} q_{ij}, \tag{2.11}$$

$$c^* = \langle c(x) \rangle + f_1 \Delta \eta_{ij} \kappa_{ij}, \tag{2.12}$$

where $I_{ijkl} = \delta_{i(k} \delta_{l)j}$ and parenthesis denote symmetrization.

THE CROSS-PROPERTY RELATIONS FOR TWO-PHASE THERMOPOROELASTIC COMPOSITES

Equations (2.7) imply that

$$f_1 \left(Q_{ijkl} - I_{ijkl} \right) = (\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(C_{mnkl}^* - \langle C_{mnkl}(x) \rangle \right). \tag{3.1}$$

Now it follows from Eqs. (2.8), (2.9)

$$\alpha_{ij}^* = \langle \alpha_{ij}(x) \rangle + \Delta \alpha_{kl} (\Delta C_{klmn})^{-1} \left(C_{mnij}^* - \langle C_{mnij}(x) \rangle \right), \tag{3.2}$$

$$\eta_{ij}^* = \langle \eta_{ij}(x) \rangle + \Delta \eta_{kl} (\Delta C_{klmn})^{-1} \left(C_{mnij}^* - \langle C_{mnij}(x) \rangle \right). \tag{3.3}$$

Because of

$$f_1 q_{ij} = -(\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(\alpha_{mn}^* - \langle \alpha_{mn}(x) \rangle \right), \tag{3.4}$$

$$f_1 \kappa_{ij} = -(\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(\eta_{mn}^* - \langle \eta_{mn}(x) \rangle \right), \tag{3.5}$$

we obtain from Eqs. (2.10) – (2.12)

$$\beta^* = \langle \beta(x) \rangle - \Delta \alpha_{ij} (\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(\alpha_{mn}^* - \langle \alpha_{mn}(x) \rangle \right), \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \langle \gamma(x) \rangle + \Delta \alpha_{ij} (\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(\eta_{mn}^* - \langle \eta_{mn}(x) \rangle \right) = \\ &= \langle \gamma(x) \rangle + \Delta \eta_{ij} (\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(\alpha_{mn}^* - \langle \alpha_{mn}(x) \rangle \right), \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$c^* = \langle c(x) \rangle + \Delta \eta_{ij} (\Delta C_{ijmn})^{-1} \left(\eta_{mn}^* - \langle \eta_{mn}(x) \rangle \right). \tag{3.8}$$

It follows that the tensor of the effective stress coefficients α_{ij}^*, tensor of thermal stress coefficients η_{ij}^*, the Biot coefficients of thermoporoelastic coupling β^*, γ^* and specific heat c^* are not the independent characteristics, but are expressed in terms of those of two phases, the frame elastic moduli of two phases and effective elastic moduli of composite material. Equations (3.2), (3.3) and (3.6)–(3.8) are the exact results independent on the microstructure of the inhomogeneous poroelastic medium.

Hence, in any homogenization process for such a material it is necessary to find only the effective frame elastic moduli C_{ijkl}^*. Then, the other effective constants of thermoporoelastic composite material can be calculated by the formulas (3.2)–(3.8).

Suppose that the both components of the inhomogeneous poroelastic medium are isotropic with bulk frame moduli K_1, K_2, effective stress coefficients α_1, α_2, thermal stress coefficients η_1, η_2. If the composite is also macroscopically isotropic with the effective bulk modulus K^*, then the formulas (3.2), (3.3) and (3.6)–(3.8) are transformed to

$$\alpha^*_{ij} = \alpha^* \delta_{ij}, \quad \alpha^* = \langle \alpha(x) \rangle + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{K_1 - K_2} \left(K^* - \langle K(x) \rangle \right), \quad (3.9)$$

$$\eta^*_{ij} = \eta^* \delta_{ij}, \quad \eta^* = \langle \eta(x) \rangle + \frac{\eta_1 - \eta_2}{K_1 - K_2} \left(K^* - \langle K(x) \rangle \right), \quad (3.10)$$

$$\beta^* = \langle \beta(x) \rangle - \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{K_1 - K_2} \left(\alpha^* - \langle \alpha(x) \rangle \right) = \\ = \langle \beta(x) \rangle - \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{K_1 - K_2} \right)^2 \left(K^* - \langle K(x) \rangle \right), \quad (3.11)$$

$$\gamma^* = \langle \gamma(x) \rangle = -\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{K_1 - K_2} \left(\eta^* - \langle \eta(x) \rangle \right) = \\ = -\frac{(\alpha_1 - \alpha_2)(\eta_1 - \eta_2)}{(K_1 - K_2)^2} \left(K^* - \langle K(x) \rangle \right), \quad (3.12)$$

$$c^* = \langle c(x) \rangle - \frac{\eta_1 - \eta_2}{K_1 - K_2} \left(\eta^* - \langle \eta(x) \rangle \right) = \\ = \langle c(x) \rangle - \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{K_1 - K_2} \right)^2 \left(K^* - \langle K(x) \rangle \right). \quad (3.13)$$

These relations coincide with those obtained in [1], [11] by some other way.

CONCLUSIONS

The exact relations between the effective thermoporoelastic characteristics (cross-property relations) of two-phase poroelastic composites were obtained and analyzed. These relations may be used in any homogenization procedure that establish the connections between the mathematical expectations of the field variables, pore pressure and temperature in the inhomogeneous poroelastic composite material.

Levin V. M., Mexican Oil Institute (Mexico City, Mexico)

EXACT RELATIONS BETWEEN EFFECTIVE THERMOPOROELASTIC CHARACTERISTICS OF POROUS COMPOSITES

Exact relations between the effective thermoporoelastic constants of two-phase heterogeneous materials (cross-property relations) are developed by some simple way. For the composite materials with the isotropic components these relations are obtained in explicit form.

Key words: poroelastic composites, effective properties, cross-property relations

REFERENCES

1. Berriman J., Milton G. Exact results for generalized Gassman's equations in composite porous media with two constituents // Gephysics. 1991. Vol. 56. P. 1950–1960.
2. Biot M. General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys. 1941. Vol. 12. P. 155–164.
3. Biot M. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33. P. 1482–1498.
4. Dunn M. Exact relations between the thermoelectroelastic moduli of heterogeneous materials // Proc. R. Soc. Lond. 1992. A, Vol. 441. P. 549–557.
5. Hashin Z. Theory of fiber-reinforced materials. NASA, 1972. CR-1974.
6. Hill R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials. I. Elastic behavior // J. Mech. Phys. Solids. 1964. Vol. 12. P. 199–212.
7. Kanaun S., Levin V. Self-consistent Methods for Composites. VI. Static Problems. Springer, 2008. 376 p.
8. Levin V. On the coefficients of thermal expansion of heterogeneous materials // Mechanics of Solid. 1967. Vol. 2. P. 58–61.
9. Markov K. Elementary micromechanics of heterogeneous solids // Heterogeneous Media: Michromecanics, Modeling Methods and Simulations / Eds. K. Markov, L. Preziosi. Boston: Birkhauser, 2000. P. 1–162.
10. Milton G. The Theory of Composites. Oxford: Cambridge University Press, 2000. 780 p.
11. Norris A. On the correspondence between poroelasticity and thermoelasticity // J. Appl. Physics. 1992. Vol. 71. P. 1138–1141.
12. Rosen B., Hashin Z. Effective thermal expansion coefficient and specific heats of composite materials // Int. J. Engng. Sci. 1970. Vol. 8. P. 157–173.
13. Torquato S. Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties. N. Y.: Springer, 2002. 728 p.
14. Schapery N. Thermal expansion coefficients of composite materials based on energy principles // J. Composite Mater. 1968. Vol. 2. P. 380–404.
15. Shulgasser K. Relationship between the effective properties of transversely isotropic piezoelectric composites // J. Mech. Phys. Solids. 1992. Vol. 40. P. 473–479.

Поступила в редакцию 18.03.2013

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Июнь, № 4 **Технические науки** **2013**

УДК 630:658.286

ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ДАВЫДКОВ
аспирант кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
davydkov@gmail.com

ДАНИЛА ВЛАДИМИРОВИЧ РОЖИН
кандидат технических наук, преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
hop@sampo.ru

АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
a_sokolov@psu.karelia.ru

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ
доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
siounev@psu.karelia.ru

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ЛЕСОСЫРЬЕВОЙ БАЗЫ*

Отсутствие развитой сети лесовозных дорог на Северо-Западе России является сдерживающим фактором развития лесозаготовок. Строительство и содержание дорог сопряжено с большими затратами, поэтому оптимальное планирование развития дорожной сети может существенно сократить расходы на эти мероприятия. Существующие методики построения сети лесовозных дорог имеют ряд недостатков. В статье рассмотрены пути устранения этих недостатков и введение нового функционала. В рамках устранения недостатков вводится модель рельефа местности и меняется выбор вершин для построения графа лесовозных дорог. Введение модели рельефа позволяет накладывать ограничения на строительство участков дорог по максимальному уклону и более точно выполнять расчет стоимости строительства дорог. Применение иного множества вершин для построения графа дорог также позволяет достичь более точной оценки расположения и стоимости строительства дорожной сети. Приведена методика расчета, позволяющая определять высоты точек из множества вершин на основе использования высот известных точек. В качестве нового функционала в методику введена модель, учитывающая изменение лесосырьевой базы во времени. Эта модель связывает расположение дорожной сети и этапы ее строительства с текущими и прогнозируемыми объемами лесозаготовок. Описана структура решения данного вопроса, состоящая из двух подзадач. Рассмотрена связь подзадач между собой и даны решения для каждой из них. Модификация существующей методики позволяет избавиться от существующих недостатков, достичь более точной оценки затрат и избежать значительных корректировок проектируемой дорожной сети, производить планирование и строительство дорожной сети на перспективу.

Ключевые слова: лесозаготовки, сеть лесных дорог, планирование лесных дорог

ВВЕДЕНИЕ

Сдерживающим фактором развития лесозаготовительной отрасли на Северо-Западе России является отсутствие развитой сети лесовозных автомобильных дорог. Строительство и содержание сети лесовозных дорог в силу почвенных и климатических особенностей региона являются дорогостоящими мероприятиями. Поэтому оптимальное планирование как непосредственно дорожной сети, так и этапов ее строительства может существенно сократить расходы на строительство и издержки на содержание сети лесовозных дорог.

Анализ работ скандинавских исследователей [5], [6], [7] показал, что уровень развития сети ЛАД в соседних странах разительно отличается от российского, что не позволяет использовать зарубежный опыт напрямую. Скандинавские страны имеют существующую сеть ЛАД, которая поддерживается в актуальном состоянии, и исследователи работают в направлении модернизации существующей сети, увеличения несущей способности дорог в межсезонье.

Из наиболее значимых публикаций по данной теме следует назвать работы [1], [3], авторы которых используют сходную методику для построения сети лесовозных автомобильных дорог. Но в используемых методиках не учитывается ряд факторов, а также сделаны различные допущения. В модели, представленной в [3], не учитываются рельеф местности, стоимость строительства при пересечении рек и болот. Серьезным допущением является построение сети дорог по точкам, соответствующим центрам укрупненных выделов. Это приводит к тому, что невозможно гарантировать оптимальность найденного решения и при строительстве дорог в него будут внесены значительные изменения. Методика, представленная в [1], построена на том же принципе: точками для построения графа дорог являются геометрические центры лесных кварталов. Методика также не учитывает особенности рельефа местности. Особенностью методики является ее практическая применимость, в модели заложены как запасы древесины, так и стоимость строительства дорог в различных условиях, учтены стоимости водопропускных систем. Целевой функцией в модели является функционал «доходы-расходы», что позволяет получать ответ на вопрос о максимальной прибыли с заданной лесосырьевой базы при минимальных затратах.

Таким образом, на данный момент существует методика построения сети ЛАД, учитывающая параметры как запасов лесосырьевой базы, так и стоимости строительства дорог. Основными недостатками данной методики являются: способ выбора точек для построения сети дорог, обеспечивающий малый набор точек, и отсутствие модели рельефа, которое может приводить к значительным корректировкам найденного решения из-за невозможности строительства дорог по критерию допустимого максимального уклона. Пути устранения этих недостатков будут рассмотрены в данной статье.

Особой задачей является строительство сети ЛАД с учетом динамики древостоя в перспективе нескольких десятков лет. Очевидно, что решения, обеспечивающие оптимальную дорожную сеть, с учетом исходных данных на текущий период и на долгосрочную перспективу будут отличаться. В данной статье описывается модель, учитывающая динамику древостоя и вариант ее реализации.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Задача оптимизации текущей методики может быть разбита на следующие подзадачи: 1) совершенствование используемых моделей; 2) введение нового функционала. В рамках совершенствования используемых моделей будут рассмотрены следующие вопросы:

- введение модели, отображающей особенности рельефа местности;
- изменение модели, используемой для построения графа, отображающего сеть ЛАД.

Совершенствование методики по данным направлениям позволит находить более точное решение задачи построения оптимальной сети ЛАД. Введение нового функционала в методику заключается в разработке методов, учитывающих динамику лесосырьевой базы и позволяющих повысить экономический эффект от строительства лесовозных дорог.

МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Описанная в [1] методика использует плоскую модель, состоящую из двух слоев: слой грунтов и слой гидрографии. В этой же работе рекомендуется включать слой рельефа для пересеченной местности. Рельеф местности должен быть учтен при расчете оптимальной сети ЛАД по следующим причинам:

- рельеф определяет возможность строительства дороги на данном участке исходя из максимально возможных допустимых руководящих уклонов;
- учет рельефа позволяет более точно оценить длину и стоимость проектируемого участка;
- возможность дополнительного задания условий на проектирование участков дорог: например, приоритет отдается участкам, проходящим по водоразделам.

Для этого в методику вводится модель рельефа местности. В модели определяются типы рельефа местности, характерные уклоны и коэффициенты удлинения трассы. Определение типов рельефа дано в табл. 1.

Таблица 1

Типы рельефа местности

Тип рельефа местности	Характеристика рельефа местности	Наибольший уклон поверхности земли	Наибольшее колебание отметок на 1 км, м
Равнинный	Ровные пространства, долины рек с пологими скатами, широкие спокойные водоразделы	1:15 (67 ‰)	≤30
Слабохолмистый	Мало расчлененный долинами рек, с отдельными редкими сопками и впадинами	1:10 (100 ‰)	<50
Холмистый (сильнопересеченный)	Местность сильно пересечена, водоразделы узкие, большое количество оврагов	1:5 (200 ‰)	<80

Значение уклона i (уклон – тангенс угла наклона) определяется по формуле

$$tg\alpha = i = \frac{h}{d} = \frac{H_{кон} - H_{нач}}{d}, \text{ доли единицы,}$$

$$i_p = i \cdot 1000, \text{ промилле (‰),}$$

где h – превышение одной точки над другой (высшей над низшей), м; $H_{кон}$, $H_{нач}$ – проектные отметки конечной и начальной точек участка, м; d – горизонтальное проложение участка, м; i_p – значение уклона, промилле (‰).

Руководящий уклон (‰) для веток имеет следующие значения: основные нормы – 40 ‰, в трудных условиях – 60 ‰, в особо трудных условиях – 90 ‰.

Степень отклонения трассы от воздушной линии характеризуется коэффициентом удлинения m, равным отношению фактической длины трассы $L_ф$ к длине трассы по воздушной линии $L_в$

$$m = \frac{L_ф}{L_в}.$$

Значения коэффициентов удлинения трасс в различных условиях приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ориентировочные значения коэффициента удлинения трассы в зависимости от категории сложности рельефа

Категория рельефа	Рельеф (тип рельефа местности)	Коэффициент удлинения трассы
1	Равнинный	1,1
2	Слабохолмистый	1,1–1,15
3	Холмистый (сильнопересеченный)	1,15–1,25

Исходя из введенной модели возможно определить, подходит ли данный участок трассы для прокладки дороги, а также определить коэффициент удлинения трассы, который будет использован при расчете стоимости строительства данного участка.

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СЕТИ ЛАД

На данный момент методика базируется на решении задачи Штейнера на графах. В качестве вершин графа используются геометрические центры лесных кварталов. Это означает, что найденная оптимальная сеть дорог будет состоять из прямолинейных отрезков, длина которых будет сопоставима с размерами квартальной сетки (1–2,25 км). При построении лесных дорог такая сеть будет постоянно корректироваться, что неизбежно приведет к удлинению трассы и удорожанию ее строительства. Для того чтобы избежать большого объема корректировок трассы при прокладке и для более точной оценки стоимости строительства трассы, необходимо использовать иное множество вершин для построения графа. Множество вершин должно удовлетворять следующим требованиям:

- вершины распределены равномерно по рассматриваемой территории;
- среднее расстояние между смежными вершинами не превышает 250 м.

Для этого в ГИС необходимо создать слой, который будет содержать множество вершин, сгенерированных под заданные условия: например, это может быть квадратная сетка, узлы которой будут служить требуемыми вершинами. Естественным образом будут определены плоские координаты каждой вершины. Для того чтобы использовать модель рельефа, определенную выше, необходимо вычислить высоту каждой вершины.

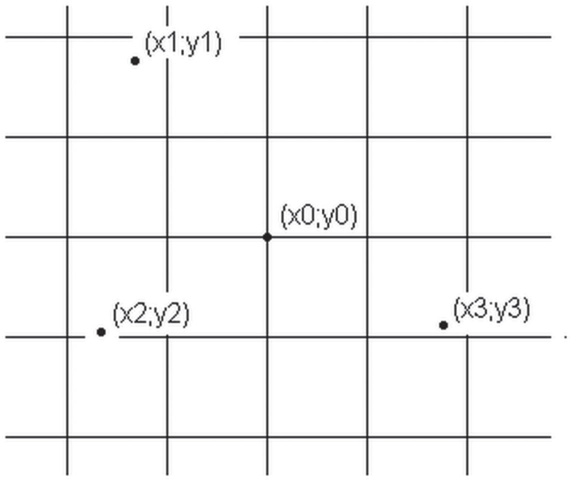


Рис. 1. Узел сетки и точки с известными высотами

Принимается допущение, что определяемая вершина лежит в одной плоскости с тремя ближайшими вершинами, высоты которых известны. Тогда высота вершины может быть вычислена исходя из следующих формул:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & h_1 \\ 1 & y_2 & h_2 \\ 1 & y_3 & h_3 \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & h_1 \\ x_2 & 1 & h_2 \\ x_3 & 1 & h_3 \end{vmatrix},$$

$$C = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}, \quad D = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & h_1 \\ x_2 & y_2 & h_2 \\ x_3 & y_3 & h_3 \end{vmatrix},$$

$$h_0 = \frac{-D - Ax_0 - By_0}{C},$$

где $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$, $(x_3; y_3)$ – координаты точек с известными высотами h_1, h_2 и h_3 соответственно, $(x_0; y_0)$ – координаты вершины, для которой определяется высота h_0.

Для определения высоты произвольной вершины необходимо выбрать три ближайшие точки с известными высотами. Выборка по данному условию может быть выполнена с помощью функций используемой ГИС MapInfo.

Таким образом, для всех вершин может быть рассчитана высота и впоследствии рассчитан уклон между смежными точками.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ ЛАД С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ЛЕСОСЫРЬЕВОЙ БАЗЫ

На данный момент не существует методик построения оптимальной сети лесовозных автодорог, которые бы учитывали этапы и темпы строительства дорог и связывали бы их с динамикой лесосырьевой базы на рассматриваемом участке. Описанные модели работают в условиях, не привязанных ко времени. Запасы спелой древесины рассматриваются на момент построения модели; временные, а также финансовые ограничения на постройку дорог не учитываются.

Введение в методику средств, учитывающих динамику древостоя, позволит соптимизировать и разработать поэтапный план строительства сети дорог в долгосрочной перспективе.

Институтом леса Финляндии разработано программное обеспечение, моделирующее динамику лесосырьевой базы в условиях Северо-Запада. Благодаря ему можно получить прогноз по параметрам лесосырьевой базы на ближайшие несколько десятков лет, а также программу рубок ухода и основных рубок. Эти данные будут использованы для расчета сети дорог в описываемой ниже методике.

Задача построения оптимальной сети дорог с учетом динамики древостоя может быть решена при помощи ее декомпозиции на две задачи:

- задача об оптимальном размещении сети дорог с учетом параметров древостоя на текущий момент и прогнозируемых;
- задача об оптимальном порядке строительства участков сети дорог.

Данные задачи решаются последовательно. Решение первой задачи служит входным условием второй задачи.

Первая задача может быть решена с использованием существующих методик. Для этого на вход алгоритму, совершающему построение сети дорог, необходимо подать модифицированные данные по объемам разрешенной к заготовке спелой и перестойной древесины. Модификация входных данных производится следующим образом:

- выбирается период времени T (года), на который будет производиться расчет от текущего момента времени;
- для выделов на рассматриваемом участке местности производится моделирование динамики древостоя на выбранный период;
- выбирается подпериод T_k, на который будет разбит период T;
- данные в каждый подпериод T_k заносятся новым слоем в ГИС-систему;
- создается новый итоговый слой в ГИС-системе, в котором данные со слоев суммируются с данными подпериодов.

Например, выбран период T = *20 лет*, подпериод T_k = *10 лет*, таким образом получаем 3 слоя данных: на текущий момент, через 10 лет и через 20 лет. На рис. 2 буквами а, б и в обозначены слои со спелой и перестойной древесиной на момент расчета, через 10 лет и через 20 лет соответственно. Данные по запасам древесины суммируются в новом слое ГИС-системы (рис. 2г) и поступают на вход алгоритму, совершающему построение сети дорог. Используя входные данные, построенные указанным способом, алгоритм построит оптимальную сеть дорог, которая обеспечит максимальную отдачу от лесосырьевой базы за выбранный период времени.

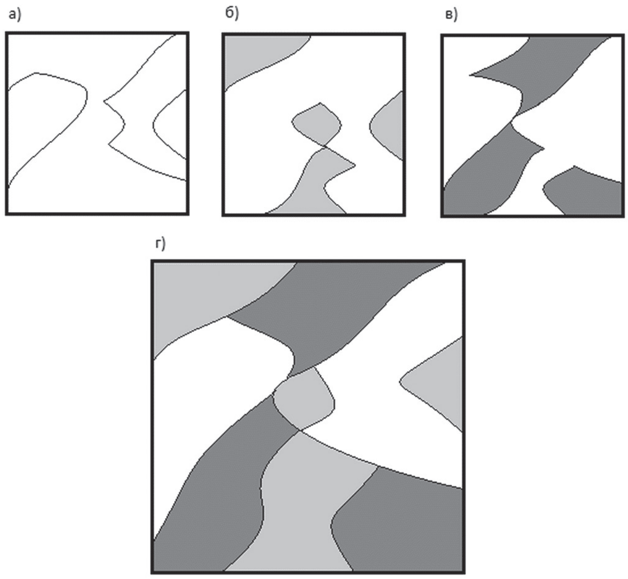


Рис. 2. Объединение слоев

Полученная сеть является входным условием для второй задачи, которая при заданных ограничениях формирует последовательность этапов построения дорог. В задаче рассматривается временной промежуток для одного этапа, равный одному календарному году. Могут быть заданы следующие ограничения.

- Максимальный объем заготавливаемой древесины за один год. Целевыми функциями алгоритма при этом могут быть: минимизация затрат на строительство дорог в год; распределение затрат на строительство дорог пропорционально заготавливаемым объемам; максимизация протяженности дорожной сети в первые годы строительства или иная целевая функция.
- Максимально допустимые затраты на строительство дорог в год (бюджет). Целе-

вой функцией в данном случае будет выступать максимизация заготавливаемой древесины либо общей длины дорожной сети.

Выбор ограничения и целевой функции будет влиять на алгоритм решения данной задачи.

Остановимся подробно на ограничении годового бюджета на строительство дорог. Для решения задачи с данным ограничением необходимо выделить из рассчитанной сети все возможные подсети, которые могут быть построены с учетом ограничения бюджета на строительство. То есть необходимо найти множество поддеревьев графа сети дорог, удовлетворяющих ограничению. Из данного множества необходимо выбрать поддерево исходя из критерия целевой функции, например, выбрать поддерево, обеспечивающее максимальный возможный объем заготавливаемой древесины. Таким образом получаем решение, состоящее из набора участков дорог, которые должны быть построены в данном году. Для расчета решения для следующего года этот алгоритм применяется повторно, входными данными будет оставшееся дерево недостроенных участков дорог. Если оставшееся дерево разбивается на изолированные деревья, то оператору программного комплекса необходимо вручную распределить доступный бюджет между ними. Итогом работы рассмотренного алгоритма кроме плана дорожной сети также будет перечисление этапов строительства данной сети.

Рассмотренные в статье вопросы позволяют модифицировать имеющуюся методику построения оптимальной сети ЛАД с целью повышения точности производимых расчетов и актуализации получаемой дорожной сети. Функционал, учитывающий изменения лесосырьевой базы, позволяет оператору программного комплекса учитывать будущие запасы древесины на рассматриваемом участке и производить расчет и планирование работ на перспективу.

* Работа выполнена при поддержке международного проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике» ППС ЕИСП «Карелия» в рамках реализации Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Катаров В. К. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог // Информационные технологии. 2011. № 1 (68). С. 39–43.
2. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С., Соколов А. П., Катаров В. К. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли – опыт Финляндии // Транспортное дело России. 2009. № 7 (68). С. 99–102.
3. Ельдештейн Ю. М., Болотов О. В. Решение задач макрологистики в лесном комплексе // Вестник КрасГАУ. 2007. № 1. С. 21–43.
4. Катаров В. К., Рожин Д. В., Туюнен М. В., Редозубов И. В. Расчет стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 2. С. 106–111.
5. Karlsson J., Ronnqvist M., Frisk M. RoadOpt: A decision support system for road upgrading in forestry. Electronic Exchange. Scandinavian Journal of Forest Research. 2006. 21 (Suppl. 7) [Electronic resource]. Access mode: http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=9791aab2-2725-4c1b-9440-304f99615e5c%40sessionmgr111&hid=118
6. Olsson L. Road investment scenarios in Northern Sweden. Electronic Exchange. Forest Policy and Economics. 2005. Vol. 7 [Electronic resource]. Access mode: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934104000036
7. Olsson L. Optimal upgrading of forest road networks: Scenario analysis vs. stochastic modeling. Electronic Exchange. Forest Policy and Economics. 2007. Vol. 9 [Electronic resource]. Access mode: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934106001729

Davydkov D. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rozhin D. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Sokolov A. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Syunev V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

SYSTEM OF OPTIMAL LOGGING ROADS' PLANNING FACTORING IN FOREST RAW MATERIAL BASE

The lack of developed logging roads' network in the North-West region of Russia is the main factor that restrains growth of timber harvesting industry. Construction and maintenance of the roads is expensive, therefore, optimal planning of the roads' network can significantly reduce expenses on them. Existing methods of the logging roads' network planning have several disadvantages. This article considers possible ways helpful in the elimination of disadvantages and an introduction of a new functional. In order to remove disadvantages a relief model of the territory is imposed, and a change in selection of a new vertex for plotting new graphs of the logging roads' network is introduced. Imposition of the relief model allows for constrains in construction of certain road sections (if a road grade is higher than allowed) and more precise price calculation of the road construction. Application of another vertex set for roads' network graph plotting makes it possible to achieve more precise roads' lay out and make more accurate calculations on the construction price. A calculation method that helps to find the height of the vertex using vertexes with known heights is provided. A new model, in the capacity of a new functional, factoring in dynamics of the forest raw material base is introduced. This model connects roads lay out and construction stages with current and expected forest harvesting volumes. This task can be divided into two subtasks. Subtasks and their connection is considered, and solutions are given for both of them. The above listed modifications of the existing method help to get rid of present disadvantages, achieve more precise expenses' evaluation, avoid serious corrections of projected road network, make long-term road planning and construction.

Key words: timber harvesting, logging road network, logging road planning

REFERENCES

1. G e r a s i m o v Yu. Yu., S o k o l o v A. P., K a t a r o v V. K. Razrabotka sistemy optimal'nogo proektirovaniya seti lesovoznykh avtomobil'nykh dorog [Development of optimal planning system for logging roads' planning]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 2011. № 1 (68). P. 39–43.
2. G e r a s i m o v Yu. Yu., S y u n e v V. S., S o k o l o v A. P., K a t a r o v V. K. Razvitie transportnoy infrastruktury lesnoy otrasli – opyt Finlyandii [Development of transportation infrastructure in forest industry]. *Transportnoe delo Rossii* [Russian carrying trade]. 2009. № 7 (68). P. 99–102.
3. E l' d e s h t e i n Yu. M., B o l o t o v O. V. Reshenie zadach makrologistiki v lesnom komplekse [Solution of macrologistics tasks in forest industry]. *Vestnik KrasGAU* [KGAU Bulletin]. 2007. № 1. P. 21–43.
4. K a t a r o v V. K., R o z h i n D. V., T u y u n e n M. V., R e d o z u b o v I. V. Raschet stoimosti stroitel'stva al'ternativnykh uchastkov lesovoznykh dorog [Calculation of alternative logging roads parts' prices]. *Transportnoe delo Rossii* [Russian carrying trade]. 2010. № 2. P. 106–111.
5. K a r l s s o n J., R o n n q v i s t M., F r i s k M. RoadOpt: A decision support system for road upgrading in forestry. Electronic Exchange. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2006. 21 (Suppl. 7). Available at: http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=9791aab2-2725-4c1b-9440-304f99615e5c%40sessionmgr111&hid=118
6. O l s s o n L. Road investment scenarios in Northern Sweden. Electronic Exchange. *Forest Policy and Economics*. 2005. Vol. 7. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934104000036
7. O l s s o n L. Optimal upgrading of forest road networks: Scenario analysis vs. stochastic modeling. Electronic Exchange. *Forest Policy and Economics*. 2007. Vol. 9. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934106001729

Поступила в редакцию 29.04.2013

Июнь, № 4 **Технические науки** **2013**

УДК 630.31

ЕЛЕНА ИГОРЕВНА РАТЬКОВА
старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ratjkova@mail.ru

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ
доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
siounev@psu.karelia.ru

ВАСИЛИЙ КУЗЬМИЧ КАТАРОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного транспорта и геодезии лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vkatarov@psu.karelia.ru

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛА «ЗАМОРАЖИВАНИЕ – ОТТАИВАНИЕ» НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ СУГЛИНКОВ*

Рассмотрено влияние цикла «замораживание – оттаивание» на модуль деформации и коэффициент сжимаемости лесных почвогрунтов на примере суглинка легкого пылеватого. Приведена методика исследования и результаты испытаний. В лабораторных условиях подтверждено, что цикл «замораживание – оттаивание» служит причиной увеличения коэффициента сжимаемости и уменьшения модуля деформации. Практическое значение полученных результатов определяется возможностью их использования для прогнозирования глубины колеи в межсезонные периоды и обоснования укрепления волоков лесосечными отходами.

Ключевые слова: почвогрунты, модуль деформации, коэффициент сжимаемости, межсезонные периоды, глубина колеи

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное применение современных лесозаготовительных и лесотранспортных машин в значительной степени затруднено по причине недостаточной развитости и несущей способности путей транспорта леса. Ограничения на их применение определяются условиями колееобразования и величиной клиренса, давлением движителя на поверхность транспортных путей и несущей способностью почвогрунтов. Характерным является пример Северо-Западного федерального округа, на лесных территориях которого преобладают почвогрунты, чья несущая способность в безморозный период недостаточна для использования современной лесозаготовительной техники.

Промерзание лесных почвогрунтов на достаточную глубину снимает ограничения на применение лесозаготовительных машин. Однако и в зимний период теплоизолирующее влияние снежного покрова и оттепели часто вносят неопределенность в оперативное планирование лесозаготовок. В межсезонные периоды по причине более интенсивного колееобразования объективно формируются ограничения на количество проходов лесозаготовительных машин, что усложняет разработку технологических схем освоения лесосеки в условиях развивающейся, но недостаточной дорожно-транспортной инфраструктуры лесопользования. В определенной мере компенсировать недостаточное количество путей лесотранспорта позволит изучение дополнительных возможностей их эксплуатации в межсезонные периоды.

Появляющаяся в этой связи многоплановая проблема технологически возможной и экономически целесообразной интенсификации использования дорожно-транспортной инфраструктуры и дорогостоящей лесозаготовительной техники в межсезонные периоды с учетом требований рационального природопользования приобретает особую актуальность в современных условиях. Соответственно, для решения научно-практических задач, связанных с данной проблемой, требуется разработка как экспериментальных методов, так и методов математического моделирования. При разработке методик решения данных задач необходимо учитывать российский и зарубежный опыт. Данная работа выполнена с учетом условий функционирования лесопромышленного комплекса в Северо-Западном регионе Российской Федерации.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Опыт решения ряда задач по развитию транспортной инфраструктуры лесной отрасли Финляндии отражен в работе [2]. Использование этого опыта возможно после его адаптации к условиям российских регионов. Вклад в решение этой задачи вносит работа [9], из которой, в частности, следует, что как в финских, так и в российских методиках проектирования лесных дорог учитываются усредненные зависимости несущей способности грунта от его гранулометрического состава и накопления в нем влаги.

Воздействие колесных движителей на лесные почвогрунты рассмотрено в статье [5], в которой предложены математические модели послойного уплотнения почвогрунта крупногабаритными шинами с развитыми грунтозацепами.

Задача распределения проходов трелевочного трактора по длине волока с учетом колееобразования рассмотрена в статье [10]. Предложено уменьшать в процессе трелевки расчетную рейсовую нагрузку на трактор в зависимости от прогнозируемого увеличения глубины колеи на участках волока со слабой несущей способностью грунта.

В статье [8] сжимаемость почв и грунтов изучена как процесс разрушения их микроструктуры, элементы которой проявляют свойства упругости и вязкопластичности. Предложена модель сжимаемости, основанная на известных представлениях о микроструктуре и выявленном автором эффекте цикличности скорости деформирования почв и грунтов.

Методика определения глубины колеи с учетом прочности грунта смятию предложена в статье [15].

В статье [7] предложена многокомпонентная модель лесной почвы как опорной поверхности движения лесохозяйственных машин.

Краткий обзор других публикаций по затронутой теме приведен в статье [11]. Не останавливаясь на детальном анализе публикаций, заметим, что авторы многих работ отмечают сложность и недостаточную изученность системы «лесозаготовительная машина – почвогрунт». При этом к числу наиболее сложных и актуальных относится названная выше задача моделирования техногенного воздействия на лесные почвогрунты с учетом особенностей межсезонных периодов [12].

Для прогнозирования техногенного воздействия в работе [11] предложена двухпараметрическая модель для определения глубины колеи в зависимости от числа проходов лесозаготовительной машины. В модели используется логистическое уравнение. Аналогичное уравнение использовано в качестве корреляционной зависимости с четырьмя параметрами в методике расчета осадки насыпи на слабых грунтах [14].

Применение логистического уравнения в моделях колееобразования рассмотрено в работах [11], [12].

Анализ представленных выше работ показал, что теоретическое определение глубины колеи после первого прохода колесной или гусеничной машины возможно, если известны модуль деформации, пористость и другие характеристики почвогрунта [6]. Эти характеристики для усредненных почвенно-климатических условий можно найти в справочной литературе [9]. Однако оценка их зависимости от почвенно-климатических условий региона в межсезонные периоды требует продолжения исследований для уточнения представлений о процессах колееобразования на почвогрунтах при воздействии лесозаготовительных машин.

В данной статье рассматривается влияние цикла «замораживание – оттаивание» на физико-механические характеристики почвогрунтов. Такие циклы неоднократно повторяются в межсезонные периоды «зима – весна» и «осень – зима». Известно, что вода, превращаясь в лед, увеличивает свой объем примерно на 9 %. Почвогрунт естественной влажности неспособен противодействовать такому увеличению объема содержащейся в нем воды (в форме льда). С изменением объема появляются внутренние силы, разрушающие связи между частицами почвогрунта. Вследствие этого могут различаться его физические свойства до замораживания и после оттаивания. Очевидно, особенно заметными эти различия будут в межсезонные периоды, для которых характерна высокая естественная влажность почвогрунтов и повторение циклов «замораживание – оттаивание».

Заметим, что внешнее проявление увеличения объема влажного грунта при отрицательных температурах хорошо известно и обозначается термином «морозное пучение».

Значимость изменения физико-механических свойств грунтов в межсезонные периоды находит отражение в строительной классификации грунтов как в России, так и за рубежом. Сравнение российских и финских классификаций грунтов применительно к проектированию, строительству и содержанию лесных дорог приведено в книге [3].

Морозное пучение является проявлением сложных процессов изменений состояния воды и структуры грунта. Детальный анализ этих изменений выходит за рамки данной работы. Рассмотрим только недостаточно изученный, что показал анализ литературы [2], [3], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], вопрос о влиянии цикла «замораживание – оттаивание» на изменения коэффициента сжимаемости и модуля деформации грунта. Рассмотрение этого вопроса необходимо для уточнения представлений о процессах колееобразования в межсезонные периоды.

Очевидно, замораживание почвогрунта естественной влажности и фазовые превращения воды служат причиной, по которой структура и, соответственно, физические свойства почвогрунта после цикла «замораживание – оттаивание» могут отличаться от свойств того же почвогрунта до его замораживания. В данной работе рассмотрено влияние цикла «замораживание – оттаивание» на коэффициент сжимаемости и модуль деформации суглинка.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости грунтов, в том числе мерзлых, изложены в [4]. Лабораторные эксперименты выполнялись на стандартном оборудовании по методике, общепринятой в механике грунтов. Одна часть образцов испытывалась до замораживания, другая часть образцов того же грунта испытывалась после цикла «замораживание – оттаивание». Замораживание образцов осуществлялось в морозильной камере при температуре –8 °С в течение 8 часов. Оттаивание – при температуре +10 °С в течение 8 часов. По результатам измерений для каждого образца определялась компрессионная зависимость, вычислялись коэффициент сжимаемости и модуль деформации. Результаты испытаний приведены в таблице.

Характеристики грунта до замораживания и после оттаивания

Состояние	Коэффициент сжимаемости mv, МПа-1	Коэффициент относительной сжимаемости m0, МПа-1	Модуль деформации Е, МПа
До замораживания	0,546	0,303	10,1
После оттаивания	0,827	0,459	9,1
Изменение, %	+51,5	+51,5	-9,9

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты испытаний показали, что цикл «замораживание – оттаивание» увеличивает коэффициент сжимаемости суглинка на 51 % и уменьшает модуль деформации на 10 %. Эти данные могут быть использованы на практике для прогнозирования глубины колеи на путях транспорта леса. Например, по причине оттепелей, прежде всего в межсезонные периоды, возможно локальное увеличение глубины колеи на некоторых избыточно увлажненных участках волока. Принимая во внимание метеорологические данные о температуре и учитывая характеристики почвогрунтов, можно, например, по известной методике [11] определить величину колеи для конкретного вида лесозаготовительной машины [6]. Если прогнозируемая глубина колеи окажется недопустимо большой, то на данном участке может быть рекомендовано локальное укрепление путей первичного транспорта лесосечными отходами.

Очевидно, целесообразно формирование региональной базы данных о свойствах лесных почвогрунтов различных типов с учетом сезонных и межсезонных изменений [12]. Оперативность практического применения базы данных может быть обеспечена использованием интернет-технологий [1]. Актуальность данной задачи подтверждается опытом России и Финляндии [2], [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторными испытаниями образцов суглинка подтверждено, что цикл «замораживание – оттаивание» служит причиной увеличения коэффициента сжимаемости и уменьшения модуля деформации. Практическое значение полученных результатов определяется возможностью их использования для определения прогнозируемой глубины колеи в межсезонные периоды в целях обоснования укрепления путей транспорта леса лесосечными отходами.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Ю. Ю., Давыдков Г. А., Кильпеляйнен С. А., Соколов А. П., Сюнёв В. С. Перспективы применения новых информационных технологий в лесном комплексе // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2003. № 5. С. 122–129.
2. Герасимов Ю. Ю., Карвинен С., Сюнёв В. С., Соколов А. П., Катаров В. К. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли – опыт Финляндии // Транспортное дело России. 2009. № 77. С. 99–102.
3. Герасимов Ю. Ю., Катаров В. К. Лесные дороги. Йоэнсуу, 2009. 70 с.
4. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. Григорьев И. В., Шкрум В. Д. Теория послойного уплотнения почвы крупногабаритными шинами лесопромышленного трактора // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2005. № 175. С. 134–141.
6. Катаров В. К., Сюнёв В. С., Ратькова Е. И., Герасимов Ю. Ю. Влияние форвардеров на лесные почвогрунты // Resources and Technology. 2012. Т. 9. № 2. С. 73–81.
7. Коршун В. Н. Основы механики лесной почвы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2006. № 4. С. 47–54.
8. Ляшенко П. А. Природа сжимаемости почв и грунтов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 19. С. 9–28.
9. Матвеенко Л. С. Автомобильные лесовозные дороги: Справочник. М.: Экология, 1991. 336 с.
10. Пискунов М. А., Воронов Р. В., Васильев В. Н., Воронова А. М. Распределение проходов по длине волока и расчет рейсовых нагрузок трелевочного трактора при движении по грунтам с низкой несущей способностью на примере хлыстовой технологии заготовки леса // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 73.

11. Р а т ь к о в а Е. И. Моделирование техногенного воздействия на лесные почвогрунты с учетом особенностей межсезонных периодов // Леса России в XXI веке: Материалы шестой междунар. науч.-техн. Интернет-конференции. Март 2011 г. СПб.: СПбГЛТА, 2011. С. 227–234.
12. С ю н ё в В. С., Р а т ь к о в а Е. И. Методика прогнозирования воздействия лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 6 (127). С. 70–74.
13. С ю н ё в В. С., С о к о л о в А. П., К о н о в а л о в А. П., К а т а р о в В. К., С е л и в е р с т о в А. А., Г е р а с и м о в Ю. Ю., К а р в и н е н С., В я л ь к к ю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия // НИИ леса Финляндии METLA. Йоэнсуу, 2008. 126 с.
14. Усовершенствованная методика расчета осадки насыпи на слабых грунтах на основе реализации математических моделей процессов лабораторных испытаний образцов // Государственный дорожный научно-исследовательский институт ФГУП «СОЮЗДОРНИИ». М., 2002.
15. Ц ы п у к А. М., Р о д и о н о в А. В. Определение глубины колеи лесных машин // Лесная промышленность. 2004. № 2. С. 21–22.

Rat'kova E. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Syunev V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Katarov V. K., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

EFFECT OF "FREEZING AND DEFROSTING" ON DEFORMATION MODULE AND COEFFICIENT OF CLAY LOAM REDUCTION

The effect of "freezing and defrosting" cycle on the module of deformation and compressibility coefficient of wood soils on the example of easy dust loam is considered. Methods of research and obtained results are provided. In laboratory settings, it was proven that the "freezing and defrosting" cycle accounts for the increase of compressibility coefficient and decrease of the model of deformation. Practical significance of the obtained results is defined by the possibility of their use to predict the depth of the track during off-season period and to substantiate strengthening of the skidding track by wood debris.

Key words: wood soils, module of deformation, compressibility coefficient, off-season periods, track depth

REFERENCES

1. G e r a s i m o v Yu. Yu., D a v y d k o v G. A., K i l ' p e l y a y n e n S. A., S o k o l o v A. P., S y u n e v V. S. Prospects of New Technologies' Use in Forest Industry [Perspektivy primeneniya novykh informatsionnykh tekhnologiy v lesnom komplekse]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal]. 2003. № 5. P. 122–129.
2. G e r a s i m o v Yu. Yu., K a r v i n e n S., S y u n e v V. S., S o k o l o v A. P., K a t a r o v V. K. Transportation Infrastructure in Forest Industry – Finnish Experience [Razvitie transportnoy infrastruktury lesnoy otrasli – opyt Finlyandii]. *Transportnoe delo Rossii* [Transportation Issue of Russia]. 2009. № 77. P. 99–102.
3. G e r a s i m o v Yu. Yu., K a t a r o v V. K. *Lesnye dorogi* [Forest Roads]. Joensuu, Forest Research Institute of Finland, 2009. 70 p.
4. *GOST 12248–2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemosti* [All-Union State Standards 12248–2010. Sub-soils. Methods of Strength Characteristics and Deformation Scale Definition].
5. G r i g o r ' e v I. V., S h k r u m V. D. Theory of Soil Consolidation by Forest Industry Tractor Retires of Large Dimension [Teoriya posloynogo uplotneniya pochvy krupnogabaritnymi shinami lesopromyshlennogo traktora]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of Saint-Petersburg Forest Academy]. 2005. № 175. P. 134–141.
6. K a t a r o v V. K., S y u n e v V. S., R a t ' k o v a E. I., G e r a s i m o v Yu. Yu. Influence of Forwarders on wood soils [Vliyanie forvarderov na lesnye pochvo-grunty]. *Resources and Technology*. 2012. T. 9. № 2. P. 73–81.
7. K o r s h u n V. N. Foundations of Wood-soils Mechanics [Osnovy mekhaniki lesnoy pochvy] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forest Journal]. 2006. № 4. P. 47–54.
8. L y a s h e n k o P. A. Nature of Soils' Decrease [Priroda szhimaemosti pochv i gruntov]. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Net Journal of Kuban State Agricultural University]. 2006. № 19. P. 9–28.
9. M a t v e e n k o L. S. *Avtomobil'nye lesovoznye dorogi* [Automobile Hauling Roads]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 336 p.
10. P i s k u n o v M. A., V o r o n o v R. V., V a s i l ' e v V. N., V o r o n o v a A. M. Distribution of tracks along skidding roads and calculation of trailing tractor's load on wood-soils on the examples of tree-length timber harvesting [Raspredelenie prokhodov po dline voloka i raschet reysovykh nagruzok trelevochnogo traktora pri dvizhenii po gruntam s nizkoy nesushchey sposobnost'yu na primere khlystovoy tekhnologii zagotovki lesa]. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Net Journal of Kuban State Agricultural University]. 2011. № 73.
11. R a t ' k o v a E. I. Modeling of man-induced impact on wood soils including special features of transitional seasons [Modelirovanie tekhnogennogo vozdeystviya na lesnye pochvogrunty s uchetom osobennostey mezhsezonnykh periodov]. *Lesa Rossii v XXI veke* [Russian Forests in XXI century]. St. Petersburg, SPbGLTA Publ., 2011. P. 227–234.
12. S y u n e v V. S., R a t ' k o v a E. I. Methods Prognosticating Harvesters' Impact on Soils during Transitional Seasons [Metodika prognozirovaniya vozdeystviya lesozagotovitel'nykh mashin na pochvogrunty v mezhsezonnye periody] Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tehnicheskie nauki" [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 6 (127). P. 70–74.
13. S y u n e v V. S., S o k o l o v A. P., K o n o v a l o v A. P., K a t a r o v V. K., S e l i v e r s t o v A. A., G e r a s i m o v Yu. Yu., K a r v i n e n S., V y a l ' k k y u Ye. *Sravnenie tekhnologiy lesosechnykh rabot v lesozagotovitel'nykh kompaniyakh Respubliki Kareliya* [Comparison of logging operation technologies in forest harvesting companies of Karelia]. Joensuu, SRI of Finland METLA, 2008. 126 p.
14. *Usovershenstvovannaya metodika rascheta osadki nasypi na slabykh gruntakh na osnove realizatsii matematicheskikh modeley protsessov laboratornykh ispytaniy obraztsov* [Advanced calculation methods of embankment displacement on weak soils with the use of mathematical models obtained in laboratory settings]. Moscow, State Road Construction Institute "SOYuZDORNII", 2002.
15. T s y p u k A. M., R o d i o n o v A. V. Definition of the track depth induced by the forest vehicles [Opredelenie glubiny kolei lesnykh mashin]. *Lesnaya promyshlennost'* [Forest Industry]. 2004. № 2. P. 21–22.

Поступила в редакцию 24.05.2013

Июнь, № 4 **Технические науки** **2013**

УДК 674.04

ВАДИМ МИХАЙЛОВИЧ КОСТЮКЕВИЧ
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vadkos@psu.karelia.ru

ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННАЯ ДРЕВЕСИНА КАК СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ*

Область применения древесины как строительного материала зависит от ее свойств. Можно получать древесину с заданными свойствами, подбирая режимы термообработки. Сравнительный анализ различных режимов термообработки позволил сделать вывод, что хотя физико-механические свойства термически обработанной древесины и зависят от породы и режимов термообработки, но, согласно зарубежным экспериментальным данным, их общая тенденция такова: чем выше температура обработки, тем лучше биологическая долговечность древесины, снижается гигроскопичность, уровень равновесной влажности, улучшаются термоизоляционные свойства. Но в то же время при увеличении температуры обработки ухудшаются прочностные характеристики древесины. Однако данные экспериментальных исследований свойств термически обработанной древесины в редких случаях могут не только несколько отличаться, но и быть противоположными, что доказывает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований влияния режимов термообработки на свойства древесины, объяснения и согласования полученных результатов с аналогичными зарубежными. Например, некоторые зарубежные источники показывают многократное увеличение стойкости к грибковым поражениям термически обработанной древесины при высоких температурах (230–240 °С). По другим данным, термомодификация древесины не оказывает существенного положительного влияния на скорость биообрастания плесневелыми грибами, напротив, с увеличением температуры обработки до 240 °С скорость грибкового поражения увеличивается. Перспективным направлением исследований является технология насыщения термомодифицированной древесины наноразмерными материалами (например, наноструктурированным шунгитом) на 3-й фазе стабилизации, охлаждения и набора влажности. Если на этой фазе в паровоздушную смесь добавить наноразмерный композит, который вместе с парами воды насытит древесину по всему объему, то можно ожидать существенного изменения ее свойств. Целесообразность исследований в данном направлении подтверждается эффективностью применения наномодификаторов в технологии производства древесно-стружечных плит.

Ключевые слова: термическая обработка древесины, термомодификация древесины, технологии термической обработки древесины, свойства термически обработанной древесины

ВВЕДЕНИЕ

Древесина по праву считается одним из самых распространенных строительных материалов. Наряду с такими преимуществами, как экологичность и легкость обработки в сравнении с другими строительными материалами, необработанная древесина имеет ряд существенных недостатков, основными из которых являются относительно малый срок эксплуатации в наружных конструкциях и нестабильность размеров в зависимости от условий окружающей среды. При этом качество изделий из древесины зависит от содержания в ней влаги, влияющей на интенсивность биологического разрушения [4].

Для улучшения потребительских свойств древесных материалов – атмосферной стойкости, устойчивости к грибковым поражениям – изделия из древесины подвергают обработке (модификации). Различают по меньшей мере 5 способов модифицирования древесины [2]: термомеханическое, химико-механическое, термохимическое, химическое, радиационно-химическое.

Химическая обработка древесины до недавнего времени была самым распространенным способом как в Европе, так и в США. Но повышение требований к экологичности деревянных конструкций в США с 2003 года и ограничения на использование химически обработанной древесины с 2004 года в странах Евросоюза заставили осваивать альтернативные технологии по термической обработке древесины, обеспечивающие получение экологически чистых деревянных конструкций с улучшенными свойствами. По результатам проведенных исследований [4] такая термически модифицированная древесина признана безопасным материалом как для наружных работ, так и для внутренней отделки помещений.

Первые статьи по технологиям термообработки древесины появились в 1930-е годы.

Но промышленного применения эти технологии не находили десятки лет по причине сложности процесса – обеспечения равномерного нагрева древесины в среде защитных газов без поверхностного обугливания. К тому же после термообработки ухудшались механические свойства древесины, что ограничивало область ее применения [15]. В 1950–70-е годы достаточно много работ по этой теме было опубликовано в Германии. Основное внимание уделялось изучению таких свойств термообработанной древесины, как стойкость к грибковым поражениям, сорбционные характеристики. Исследовались процессы термообработки древесины под высоким давлением.

С 80-х годов XX века в Европе быстро возрастает интерес к экологически чистым строительным материалам и термическая обработка древесины признается перспективным методом улучшения ее биологической стойкости без добавления химических веществ. Различные методы термической обработки древесины развивались в Германии, Франции, Финляндии и Нидерландах [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Термическая модификация древесины заключается в ее нагреве и выдержке при температуре от 160 до 270 °С в бескислородной среде. Технологии обработки различаются режимами нагрева древесины и видом защитной среды.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основные технологии термической обработки древесины, получившие распространение и промышленное внедрение, приведены в таблице.

Параметры технологических процессов и продолжительность термической обработки древесины зависят от породы древесины, размеров заготовок, начальной влажности и требуемых свойств. Как правило, обработка включает три фазы:

1. Нагревание древесины и сушка в паровоздушной среде практически до нулевой влажности;
2. Тепловая обработка при температуре, вызывающей необратимые изменения в древесине и выдерживание температуры в течение нескольких часов в зависимости от требуемых свойств;
3. Постепенное охлаждение, стабилизация (выдержка) и набор влажности 4–7 %.

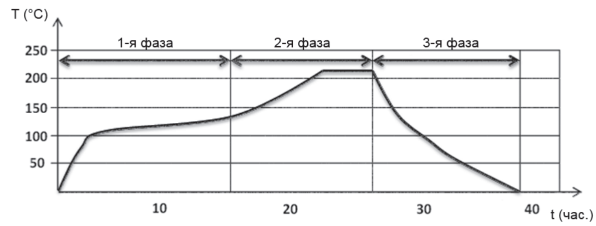


Рис. 1. Фазы термообработки

Представленный на рис. 1 режим обработки соответствует технологии Thermowood. Но в той или иной степени эти фазы присутствуют во всех известных технологиях термической обработки древесины. Продукт такой обработки называют термодревесиной.

В настоящее время в мире производится более 250 тыс. м^3 термодревесины в год, причем ее рынок ежегодно растет на 20–25 %. Одним из основных мировых производителей термически обработанной древесины является Финляндия. Финская технология Thermowood является наиболее распространенной в мире и поддерживается Финской ассоциацией Thermowood (Finnish Thermowood Association) [8], [12], [13].

СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

При нагревании древесины до 180–250 °С происходит изменение ее свойств. Физико-механические свойства термически обработанной

Основные технологии термомодифицирования древесины

Технология ТМ	Параметр ТМ				
	Защитная среда	Температура, °С	Продолжительность цикла ТМ, час.	Этап кондиционирования	Давление, МПа
Thermowood	Водяной пар	185–215	2–3 (весь процесс – 36)	+	0,1
Bois Perdure	Парогазовая смесь (выпаривание из древесины)	200–240	10	+	>0,1
Retification (Bois Retifie)	Инертный газ азот	220–250	7–16	+	0,1
PLATO	Перегретая вода	160–190	4–5 (весь процесс – 120)	+	0,6–1,6
Oil Heat Treated	Растительные масла	180–220	4 (весь процесс – 18)	–	0,1
Westwood	Водяной пар	205–230	2–3 (весь процесс – 14)	+	0,1
Вакуум плюс	Не требуется	130–195	24	+	0,02

древесины зависят от породы и режимов термообработки, но общая тенденция такова: чем выше температура обработки, тем лучше биологическая долговечность древесины. Но в то же время ухудшаются механические свойства древесины. Существенные изменения проявляются при температуре 150 °C и выше, при которой начинается разрушение гемицеллюлозы. При дальнейшем нагреве изменения свойств древесины становятся необратимыми, некоторые экстрактивные вещества выходят, древесина становится темнее. В результате увеличивается долговечность обработанной древесины, снижается гигроскопичность, уровень равновесной влажности, улучшаются термоизоляционные свойства.

Плотность термообработанной древесины и ее *вес* коррелированны; для различных пород наблюдается снижение указанных свойств в среднем на 5–15 % при температурах обработки свыше 200 °C [13]. Другие данные представлены в работе [1]: базисная плотность древесины (сосна и береза) несколько увеличивается (до 5 %) при нагреве от 165 до 185 °C. Для ели в этой же работе зафиксировано увеличение плотности от 331 до 397 кг/м^3 при нагреве до 165 °C.

Результаты испытаний *твердости* показали, что существенных изменений при термообработке древесины не наблюдается. При увеличении температуры нагрева происходит незначительный рост твердости.

Прочность древесины в целом тесно связана с плотностью. Термообработанная древесина в некоторых случаях менее прочна. Однако в работе [16] приводятся данные, которые показывают рост (около 20 %) механической прочности березы после термообработки при 180–200 °C в течение примерно одного часа. При этом обращается внимание на то, что изменение цвета может быть использовано для контроля и управления изменением прочности. Прочность древесины также в значительной степени зависит от содержания влаги.

Термообработка при температуре ниже 200 °C практически не влияет на прочность при изгибе. При более высокой температуре возможно некоторое уменьшение такой прочности [8], [12]. *Предел прочности при изгибе* зависит как от температуры, так и от породы древесины. Так, нагрев ели до 165 °C приводит к увеличению предела прочности с 63,8 до 74,4 МПа [1]. А для образцов сосны и березы, напротив, наблюдается снижение предела прочности на изгиб. Например, при нагреве березы до 185 °C предел прочности на изгиб снижается на 44 % – с 131 до 73 МПа. Более высокие температуры нагрева вызывают уменьшение прочности на изгиб для большинства пород. По данным ассоциации Thermowood, при нагреве образцов до более высоких температур (220–230 °C) также наблюдается значительное (до 40 %) снижение предела прочности на изгиб. В работе [13] приведены значения предела прочности в зависимости от температуры и технологии термообработки. Как видно из рис. 2, при t = 220 °C предел прочности на изгиб снижается более чем в 2 раза, причем механические характеристики при обработке в масле выше, чем в паровоздушной смеси.

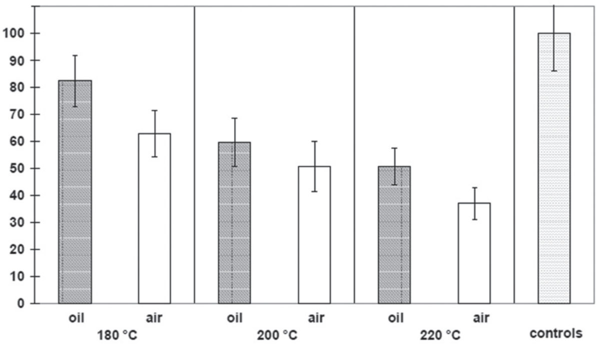


Рис. 2. Прочность термообработанной древесины [13]

Необходимо отметить, что конкретные значения прочностных характеристик зависят не только от породы, температуры нагрева, но и от размеров образцов, дефектности материала, режимов термообработки и т.д. Поэтому целесообразно дальнейшее более детальное исследование свойств термически модифицированной древесины, особенно используемых в настоящее время лиственных пород, таких как береза и осина.

Прочность при сжатии. Испытания в Техническом исследовательском центре Финляндии (VTT) показали, что термообработка оказывает положительное влияние на значения предела прочности на сжатие практически для любой породы древесины. По данным исследований, проводившихся в МГУЛ [1], предел прочности на сжатие возрастает приблизительно на 15–25 % для таких пород, как сосна, ель, береза.

Термообработка приводит к уменьшению *равновесной влажности* древесины в среднем на 50 % по отношению к необработанной древесине. Значение равновесной влажности стабилизируется и составляет примерно 3–5 %. Низкая гигроскопичность важна для биологической долговечности древесины. Термообработанная древесина остается пористым материалом, но свойство адсорбции воды ниже в 4–5 раз по сравнению с необработанной древесиной. Были проведены испытания по динамике набора воды обработанным и необработанным деревом (древесина находилась в воде почти 7 суток, а затем высыхала при комнатной температуре). Обработанная древесина набрала 18 % влажности против 70 % у необработанной [7].

Снижение влажности древесины способствует снижению *теплопроводности* приблизительно на 20–25 % [13]. Термообработка существенно (до 3–4 раз в зависимости от уровня влажности) снижает *разбухание*. Соответственно, происходит *стабилизация геометрических размеров.* У термообработанной древесины тангенциальная и радиальная размерная стабилизация существенно улучшается (в 10–15 раз). Соответственно, при высыхании обработанная древесина почти не накапливает внутренних напряжений. Эти свойства повышают качество термически обработанной древесины как строительного материала.

Как отмечено выше, одним из главных факторов ври выборе строительных материалов из древесины является ее *долговечность.* За счет высоких температур обработки в древесине уничтожаются насекомые и их личинки, грибы и их споры, разлагаются гемицеллюлозы, что на фоне низкой равновесной влажности устраняет условия для возникновения и размножения грибков и микроорганизмов. Лабораторные испытания, проведенные в Финляндии (VVT) и Франции (CTBA), подтвердили абсолютную устойчивость древесины к биологическим поражениям при температуре обработки 220–230 °С. Таким образом, было доказано, что термообработанная древесина не нуждается ни в какой химической защите. Однако в работе [3] приведены противоположные результаты: термомодификация не оказывает существенного положительного влияния на скорость биообрастания плесневелыми грибами, напротив, с увеличением температуры обработки до 240 °С скорость обрастания увеличивается. Полученный результат авторы объясняют испарением под действием высоких температур с поверхности древесины экстрактивных веществ, которые являются природным антисептиком, препятствующим биологическому разрушению древесины.

ВЫВОДЫ

Краткий обзор зарубежных и отечественных исследований свойств термически обработанной древесины показал, что данное направление является перспективным с точки зрения получения экологически чистого, долговечного строительного материала с заданными свойствами. Однако не все вопросы в этой области исследованы в достаточной для практики степени. Широкая вариативность параметров (порода древесины, фазовые температуры нагрева, продолжительность термообработки, начальная влажность древесины, вид термообработки и т. д.) обусловливает необходимость проведения новых экспериментальных исследований влияния режимов термообработки на свойства древесины, объяснения и согласования полученных результатов с аналогичными зарубежными. В этой связи к перспективным исследованиям может быть отнесена разработка технологии комбинированной модификации древесины, в которой тепловое воздействие совмещается с применением наномодификаторов. В качестве наномодификатора может быть использован, например, наноструктурированный шунгит на третьей фазе стабилизации, охлаждения и набора влажности (рис. 1). Целесообразность исследований в данном направлении подтверждается эффективностью применения наномодификаторов в технологии производства древесно-стружечных плит [5]. Однако применение наномодификаторов в сочетании с термической обработкой древесины имеет существенные отличия от известных технологических решений, в связи с чем необходимо продолжение исследований с учетом отмеченных выше данных.

* Работа выполнена в рамках проекта «Комплексные исследования в области инновационных технологий лесопользования на Европейском Севере» (руководитель – А. В. Питухин) Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимирова Е. Г. Влияние термической модификации на некоторые физико-механические свойства древесины сосны (*Pinus sylvestris*) // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 5 (81). С. 97–102.
2. ГОСТ 23944-80. Древесина модифицированная. Термины и определения.
3. Кайнов П. А., Хасаншин Р. Р., Ахмадиева С. В. Исследование бистойкости термомодифицированной древесины в условиях воздействия дереворазрушающих грибов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 15. С. 233–234.
4. Налимов Н. Термодревесина // ЛесПромИнформ. 2008. № 9 (58). С. 150–155.
5. Питухин А. В., Панов Н. Г., Колесников Г. Н., Васильев С. Б. Влияние добавки нанопорошка шунгита в клеевой раствор для изготовления трехслойных древесностружечных плит на их физико-механические свойства // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. Электронный журнал [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.science-education.ru/104–6886
6. Разумов Е. Ю., Данилова Р. В. Способ обработки термомодифицированной древесины // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 4. С. 74–78.
7. Электронный учебник Thermowood [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.thermowood.fi/brochurestexts
8. Boonstra M. J., Van Acker J., Kegel E., Stevens M. Optimisation of a two stage heat treatment process. Durability aspects // Wood Science and Technology. 2007. № 41 (1). P. 31–57.
9. Jamsa S., Ahola P., Viitaniemi P. Long-term natural weathering of coated ThermoWood // Pigment & Resin Technology. 2000. Vol. 29. № 2. P. 68–74.
10. Jamsa S., Viitaniemi P. Heat treatment of wood. Better durability without chemicals // Nordiske Trebeskyttelserad. Lofoten, 1998. Aug. № 13–16. P. 47–51.
11. Kamdem D. P., Pizzi A., Guyonnet R., Jermannaud A. Durability of Heat-Treated Wood. IRG/WP 99-40145. 1999. 15 p. [Electronic resource]. Access mode: http://www.irg-wp.com/irgdocs/details.php?7a94be68-e0b2-4e64-8d92-070826f08f9c
12. Manoj Kumar Dubey. Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil: Doctoral Thesis. University of Canterbury, 2010. 191 p.

13. Review on heat treatments of wood / Ed. by Andreas O. Rapp. Hamburg: BFH, 2001. 68 p.
14. Sini Metsä-Kortelainen Differences between sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) under water and decay exposure: Doctoral Thesis. Espoo, 2011. 58 p.
15. Sundqvis B. Colour Changes and Acid Form in Wood During Heating: Doctoral Thesis. Divisions of Wood Material Science. Skelleftea Campus. Lulea University of Technology, 2004 50 p.
16. Sundqvist B., Karlsson O., Westermark U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness // Wood Science and Technology. 2006. P. 549–561.
17. Tjeerdsma B. F., Boonstra M., Militz H. Thermal modification of non-durable wood species. IRG/WP 98-40124. 1998. 10 p. [Electronic resource]. Access mode: http://www.irg-wp.org/search%20documents.htm

---

Kostyukevich V. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

THERMO MODIFIED WOOD AS CONSTRUCTION MATERIAL

The field of wood application as a construction material depends on its properties. Various heat treatment conditions help to obtain wood with desired properties. Comparative analysis of various heat treatment revealed that physical and mechanical properties of the heat-treated wood vary and depend on the species and conditions of the heat treatment. According to the experimental data of foreign investigations the general tendency can be described as the following – the higher is the processing temperature the better is the wood's biological durability; hygroscopicity and the level of the equilibrium moisture content decrease; thermal insulation properties improve. At the same time, with the increase of the processing temperature the strength properties of the wood reduce. However, in rare cases results of experimental studies of the heat-treated wood properties may not only differ slightly, but also be opposite. This proves the need for further experimental studies of the heat treatment effect on wood properties. The studies are needed to explain and compare the obtained results with the similar foreign ones. Some authors show remarkable fungus resistance of the wood treated at high temperatures of 230–240 °C. However, according to other works, thermo treatment process does not have any positive effect on fungus resistance. On the contrary, with the temperature increase to 240 °C the rate of decay by fungi increases. A perspective direction of the research is an elaboration of technology aimed to saturate thermo modified wood with nanoscale materials (e.g. nano-structured shungite) during the third phase of stabilization, cooling and water saturation by wood. Addition of nanoscale composites into the steam at this stage, which together with water vapor will saturate the wood throughout the volume, helps to get significant changes in wood properties. The expedience of the research in this area is confirmed by the effectiveness of nanomodifiers' usage in the chipboard production technology.

Key words: heat treatment of wood, thermowood, heat treatment regimes of wood, properties of heat-treated wood

REFERENCES

1. Vladimirova E. G. Effect of Thermal Modification on Some Physical and Mechanical Properties of Pine (Pinus sylvestris) [Vliyanie termicheskoy modifikatsyi na nekotorye fiziko-mekhanicheskie svoystva drevesiny sosny]. *Lesnoy vestnik* [Forest Gazette]. 2011. № 5 (81). P. 97–102.
2. GOST 23944-80. Wood Modified. Terms and definitions [Drevesina modifitsirovannaya. Terminy i opredeleniya].
3. Kaynov P. A., Khasanshin R. R., Akhmadieva S. V. Investigation of Bioresistance Thermo Modified Wood in Conditions of Tree Decay Fungi [Issledovanie biostoykosti termomodifitsirovannoy drevesiny v usloviyakh vozdeistviya derevorazrushaushchikh gribov]. *Vesthik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Kazan Technological University Gazette]. 2012. № 15. P. 233–234.
4. Nalimov N. Thermowood [Termodrevesina]. *LesPromInform* [LesPromInform]. 2008. № 9 (58). P. 150–155.
5. Pitukhin A. V., Panov N. G., Kolesnikov G. N., Vasil'ev S. B. The Influence of Shungite Nanopowder Admixture to the Glue for Manufacturing of Three-Play Wood Chipboard on Its Physical and Mechanical Properties [Vliyanie dobavki nanoporoshka shungita v kleevoy rastvor dlya izgotovleniya trekhsloynykh drevesnostruzhechnykh plit na ikh fiziko-mekhanicheskie svoystva]. *Sovremennye problemy nayki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2012. № 4. Electronic journal. Available at: www.science-education.ru/104–6886
6. Razumov E. U., Danilova R. V. A Method of Treating Thermomodified Wood [Sposob obrabotki termomodifitsirovannoy drevesiny]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Kazan Technological University Gazette]. 2011. № 4. P. 74–78.
7. Electronic Thermowood handbook. Available at: http://www.thermowood.fi/brochurestexts
8. Boonstra M. J., Van Acker J., Kegel E., Stevens M. Optimisation of a two stage heat treatment process. Durability aspects. Wood Science and Technology. 2007. № 41 (1). P. 31–57.
9. Jamsa S., Ahola P., Viitaniemi P. Long-term natural weathering of coated ThermoWood // Pigment & Resin Technology. 2000. Vol. 29. № 2. P. 68–74.
10. Jamsa S., Viitaniemi P. Heat treatment of wood. Better durability without chemicals // Nordiske Trebeskyttelserad. Lofoten, 1998. Aug. № 13–16. P. 47–51.
11. Kamdem D. P., Pizzi A., Guyonnet R., Jermannaud A. Durability of Heat-Treated Wood. IRG/WP 99-40145. 1999. 15 p. [Electronic resource]. Access mode: http://www.irg-wp.com/irgdocs/details.php?7a94be68-e0b2-4e64-8d92-070826f08f9c
12. Manoj Kumar Dubey. Improvements in stability, durability, and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil: Doctoral Thesis. University of Canterbury, 2010. 191 p.
13. Review on heat treatments of wood / Ed. by Andreas O. Rapp. Hamburg, BFH, 2001. 68 p.
14. Sini Metsä-Kortelainen Differences between sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) under water and decay exposure: Doctoral Thesis. Espoo, 2011. 58 p.
15. Sundqvis B. Colour Changes and Acid Form in Wood During Heating: Doctoral Thesis. Divisions of Wood Material Science. Skelleftea Campus. Lulea University of Technology, 2004. 50 p.
16. Sundqvist B., Karlsson O., Westermark U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness // Wood Science and Technology. 2006. P. 549–561.
17. Tjeerdsma B. F., Boonstra M., Militz H. Thermal modification of non-durable wood species. IRG/WP 98-40124. 1998. 10 p. [Electronic resource]. Access mode: http://www.irg-wp.org/search%20documents.htm

Поступила в редакцию 11.04.2013

Июнь, № 4 **Технические науки** **2013**

УДК 519*863+630*311+630*782

ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА ИВАНОВА
аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
olga402i@mail.ru

ЗАДАЧИ КОМПЛЕКТАЦИИ ПАРКА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ*

Рассмотрена проблема комплектации парка лесовозных автопоездов для полного или частичного обновления имеющегося подвижного состава и формирования парка лесовозных автопоездов, используемых на вывозке. Разработаны математические модели, позволяющие обосновать комплектацию парка лесовозных автопоездов на основе затрат на содержание одной машино-смены и значений сменной производительности. Представлены алгоритмы – решения оптимизационных задач с использованием метода динамического программирования. Полученные результаты позволят лесозаготовителям комплектовать парк лесовозных автопоездов с минимальными затратами на их содержание, учитывая особенности применяемых технологий, используемых на вывозке. Применение на практике предлагаемых моделей позволит значительно повысить технико-экономические показатели деятельности лесозаготовительного предприятия.

Ключевые слова: затраты на содержание, парк лесовозных автопоездов, математическая модель, объем вывозки, сменная производительность

В настоящее время особое внимание уделяется проблеме совершенствования лесозаготовительного процесса на стадии транспортировки заготовленных лесоматериалов лесовозными автопоездами. Результаты исследований данного вопроса отражены в научных трудах О. Н. Бурмистровой [2], В. К. Курьянова [6], С. В. Ляхова [8] и др. Колоссальный вклад внесли также ученые и специалисты ПетрГУ: А. В. Кузнецов [5], [10], А. М. Крупко [4], В. М. Лукашевич [7], В. И. Скрыпник [10], Л. В. Щеголева [11] и др. Стоит отметить, что перечисленные работы ученых и специалистов ПетрГУ написаны под руководством профессора И. Р. Шегельмана [10]. Все указанные выше авторы к решению данного вопроса подходили с разных точек зрения. В работе [4] предложена математическая модель рациональной структуры парка лесовозных автопоездов лесозаготовительного предприятия, учитывающая амортизацию автопоездов и сезонный характер лесозаготовок.

При решении названной проблемы целесообразнее учитывать не амортизацию как отдельный экономический показатель, характеризующий объем затрат на содержание лесовозных автопоездов, а показатель затрат на содержание одной машино-смены лесовозного автопоезда, учитывающий амортизационные отчисления, затраты на текущий и средний ремонт, горюче-смазочные материалы и заработную плату рабочих.

В данной статье представлен подход к решению проблемы комплектации парка лесовозных автопоездов, который включает в себя два этапа. На первом этапе необходимо обосновать комплектацию парка лесовозных автопоездов для обновления подвижного состава, используемого на вывозке, на втором этапе – обосновать оптимальную комплектацию автопоездов, используемых на вывозке, учитывая приобретенные и имеющиеся автопоезда.

Для обоснования комплектации парка лесовозных автопоездов с целью обновления имеющегося подвижного состава будем предполагать, что лесозаготовительное предприятие планирует приобрести определенное количество лесовозных автопоездов для выполнения нормированного сменного объема вывозки. Каждый автопоезд характеризуется сменной производительностью и затратами на содержание одной машино-смены. Требуется определить, какое количество автопоездов необходимо приобрести для выполнения сменного объема вывозки.

Для описания математической модели введем обозначения индексов, параметров и переменных, используемых в ней: I – множество индексов марок автопоездов, рассматриваемых для замены подвижного состава; $\arg\min C_i$ – индекс автопоезда, имеющего минимальные затраты на содержание одной машино-смены; x_i – количество приобретаемых автопоездов марки i; W – нормированный сменный объем вывозки, м^3; P_i – сменная производительность автопоезда марки i, м^3/см; C_i – затраты на содержание одной машино-смены автопоезда марки i, руб./м-см; n – количество автопоездов, шт.; $C_{\arg\min C_i}$ – минимальные затраты на содержание одной машино-смены автопоезда вида $\arg\min C_i$, руб./м-см; $P_{\arg\min C_i}$– сменная производительность автопоезда вида $\arg\min C_i$, м^3/см.

Построим математическую модель. Общий объем вывозки заготовленных лесоматериалов ограничен нормированным сменным объемом вывозки:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot x_i \geq W. \quad (1)$$

Ограничения на переменные:

$$x_i \geq 0, \quad x_i \in Z, \quad i = 1,...,n. \quad (2)$$

Целевая функция минимизирует затраты на содержание одной машино-смены всех автопоездов:

$$\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot x_i \to \min. \quad (3)$$

Для решения оптимизационной задачи будем использовать метод динамического программирования [1], [3]. Так как данный метод используется для задач с целочисленными исходными данными, а значения P_i и W измеряются в сотых долях, то для нахождения оптимального решения необходимо перевести значения P_i и W в целые числа, умножив на 100.

Пусть функция $\varphi(y)$ отображает минимальные затраты на содержание автопоездов при выполнении объема вывозки y:

$$\phi(y) = \min\left\{\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot x_i \middle| \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot x_i \geq y, x_i \geq 0, x_i \in Z, i = 1,..,n\right\}. \quad (4)$$

Для хранения номеров автопоездов, при использовании которых достигается минимум функции $\varphi(y)$, введем дополнительный массив $\psi(y)$.

Вычислим начальные значения функций $\varphi(y)$ и $\psi(y)$ при значении $y = 0$ (5), (6) и $0 < y < P_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i}$ (7), (8):

$$\varphi(y) = 0 \quad (5)$$

$$\psi(y) = 0 \quad (6)$$

$$\varphi(y) = C_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i}, \quad y = 1, ..., P_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i} \quad (7)$$

$$\psi(y) = \underset{i=1..n}{\arg\min}\, C_i. \quad (8)$$

Для определения значений функций $\varphi(y)$ и $\psi(y)$ при $P_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i} < y < W$ воспользуемся рекуррентным соотношением Беллмана:

$$\varphi(y) = \min_{i=1..n}\{\varphi(y - P_i) + C_i\}, \quad y = P_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i}, ..., W, \quad (9)$$

$$\psi(y) = i. \quad (10)$$

Представленная оптимизационная задача реализована на языке программирования Visual Basic в Microsoft Office Excel [9]. Алгоритм расчета количества автопоездов, необходимых для обновления имеющегося подвижного состава, состоит из четырех этапов.

1. Сортировка по возрастанию исходных данных по критерию «затраты на содержание одной машино-смены».

2. Заполнение массивов $\varphi(y)$ и $\psi(y)$ при $y = 0$ на основе соотношений (5), (6) и $0 < y < P_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i}$ – (7), (8).

3. Заполнение массивов $\varphi(y)$ и $\psi(y)$ при $P_{\underset{i=1..n}{\arg\min} C_i} < y < W$ на основе соотношений (9), (10).

4. Подсчет количества автопоездов, необходимых для замены подвижного состава, следует начать со значения функции $\varphi(y)$ при $y = W$, тогда функции $\psi(y)$ присваивается значение номера автопоезда $\psi(y) = i$, при котором функция $\varphi(y)$ минимальна. Следовательно, для дальнейших расчетов от нормы сменного объема вывозки вычитаем значение сменной производительности того автопоезда, которому присвоен номер i на предыдущем этапе расчетов, тогда номер следующего автопоезда, включенного в автопарк, равен $\psi(y - P_i)$. Подсчет производим до тех пор, пока значение объема вывозки не станет равным нулю ($y = 0$).

На втором этапе обоснуем комплектацию парка лесовозных автопоездов, используемых на вывозке. На данном этапе необходимо распределить имеющиеся автопоезда на вывозке таким образом, чтобы выполнялась сменная норма объема вывозки, а затраты на содержание были минимальны. Опишем математическую модель, действующую в задаче. Введем обозначения: J – множество индексов автопоездов, включенных в состав автопарка, используемого на вывозке; n – количество автопоездов, рассматриваемых для комплектации автопарка, используемого на вывозке; x_i – переменная принимает значение 1, если автопоезд j используется на вывозке, 0 – иначе, j $\in J$; P_j – сменная производительность, выполняемая j-м автопоездом, j $\in J$, м^3/см; C_j – затраты на содержание одной машино-смены j-го автопоезда, j $\in J$, руб./м-см; $R_j = \sum_{j=1}^{n} P_j$ – сумма сменных производительностей для k первых автопоездов, м^3/см; W – нормированный сменный объем вывозки, м^3.

Опишем математическую модель задачи. Общий объем вывозки заготовленных лесоматериалов ограничен нормированным сменным объемом вывозки:

$$\sum_{j=1}^{n} P_j \cdot x_j \geq W. \quad (11)$$

Ограничения на переменные:

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1,...,n. \quad (12)$$

Целевая функция минимизирует затраты на содержание одной машино-смены всех автопоездов, используемых в технологическом цикле:

$$\sum_{j=1}^{n} C_j \cdot x_j \to \min. \quad (13)$$

Как и в первой задаче, для решения будем использовать метод динамического программирования.

Введем функцию $\varphi_j(y)$, которая отображает минимальные затраты на содержание автопарка среди первых j автопоездов при выполнении сменной нормы вывозки y:

$$\varphi_j(y) = \min\left\{ \sum_{j=1}^{n} C_j \cdot x_j \,\middle|\, \sum_{j=1}^{n} P_j \cdot x_j \geq y,\; x_j \in \{0,1\},\; j = 1, \ldots, n \right\}. \quad (14)$$

На начальном этапе расчетов необходимо отсортировать исходные данные по критерию «Производительность в смену» по возрастанию. Объем вывозки для первых рассматриваемых автопоездов j функции $\varphi_j(y)$ выразим через R_j. Объем вывозки для всех рассматриваемых автопоездов функции $\varphi_n(y)$ определяет максимальный объем вывозки, выполняемый всеми рассматриваемыми автопоездами $y = R_n$. В расчетах необходимо учитывать, что значение сменной нормы вывозки не должно быть больше объема вывозки всех рассматриваемых автопоездов $W \leq R_n$.

Для отображения использования рассматриваемого автопоезда при выполнении объема вывозки y введем вспомогательный массив $\psi_j(y)$. По значениям массива $\psi_j(y)$ будем определять оптимальный набор автопоездов, при котором функция $\varphi_j(y)$ принимает минимальные значения. Если $\psi_j(y) = 1$, рассматриваемый автопоезд при выполнении объема вывозки y используется, если $\psi_j(y) = 0$, автопоезд не используется.

Зададим начальные условия функции $\varphi_j(y)$ и $\psi_j(y)$ для первого автопоезда:

$$\varphi_1(y) = C_1, \quad \text{если} \quad y \leq R_1, \quad (15)$$

$$\psi_1(y) = 1, \quad \text{если} \quad y \leq R_1. \quad (16)$$

Для нахождения минимальных затрат на содержание одной машино-смены для оставшихся автопоездов построим рекуррентное соотношение Беллмана:

$$\varphi_j(y) = \begin{cases} \min\left\{\varphi_{j-1}(\max(0, y - P_j)) + C_j, \varphi_{j-1}(y)\right\}, & \text{если } y \leq R_{j-1} \\ \varphi_{j-1}(\max(0, y - P_j)) + C_j & \text{если } R_{j-1} < y \end{cases}, \quad (17)$$

$$y = 0, \ldots, R_n, \quad j = 2, \ldots, n, \quad (18)$$

где $\varphi_{j-1}(y)$ – функция, отображающая минимальные затраты на содержание автопарка среди предыдущих j автопоездов при выполнении объема вывозки y; $\max(0, y - P_j)$ показывает объем работы, которую необходимо выполнить автопоездами с индексами $j = 1, ..., j - 1$; $R_{j-1}(y)$ – объем вывозки предыдущих j автопоездов.

Определим значения массива $\psi_j(y)$

$$\psi_j(y) = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad \varphi_j(y) \leq \varphi_{j-1}(y), \quad \text{при} \quad y \leq R_{j-1} \\ 0, & \text{иначе} \quad \text{при} \quad y \leq R_{j-1} \\ 1, & \text{если} \quad y > R_{j-1} \end{cases}. \quad (19)$$

Представленная оптимизационная задача реализована на языке программирования Visual Basic в Microsoft Office Excel. Алгоритм расчета состоит из четырех этапов.

1. Сортировка по возрастанию исходных данных по критерию «Производительность в смену».
2. Заполнение массивов $\varphi_j(y)$ и $\psi_j(y)$ для первого рассматриваемого автопоезда согласно соотношениям (15), (16).
3. Заполнение массивов $\varphi_j(y)$ и $\psi_j(y)$ для последующих автопоездов согласно соотношениям (17)–(19).
4. Подсчет количества автопоездов, используемых на вывозке, начинается с последнего рассматриваемого автопоезда при значении $y = W$. Каждый автопоезд можно включить в используемый на вывозке автопарк только один раз, если функция $\psi_j(y) = 1$, то значение функции для следующего автопоезда $\psi_{j-1}(y - P_j)$; если функция $\psi_j(y) = 0$, то $\psi_{j-1}(y)$. Подсчет автопоездов осуществляется до тех пор, пока значение объема вывозки не станет равным нулю ($y = 0$).

ВЫВОДЫ

Разработаны математические модели, позволяющие обосновать комплектацию лесовозных автопоездов при обновлении подвижного состава и формировании автопарка, используемого на вывозке на основе минимизации затрат на содержание одной машино-смены.

Принимая в качестве оптимизационного показателя затраты на содержание одной машино-смены, лесозаготовитель в одном показателе учитывает амортизационные отчисления, затраты на текущий и средний ремонт, горюче-смазочные материалы и заработную плату основных и дополнительных рабочих.

Используя в качестве ограничения суммарную сменную производительность, рассчитанную в зависимости от технологической схемы, используемой на вывозке, учитывается условие выполнения сменной нормы вывозки.

В настоящее время автором ведется сбор информации для апробации разработанных математических моделей.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритмы: построение и анализ: Пер. с англ. / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн / Под. ред. И. В. Красикова. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.

2. Бурмистрова О. Н. Повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог: для условий Республики Коми: Дис. … канд. техн. наук. Воронеж, 2001. 234 с.
3. Воронов Р. В. Введение в методы решения комбинаторных оптимизационных задач. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006. 34 с.
4. Крупко А. М. Совершенствование технологических процессов транспортного освоения лесных участков лесовозными автопоездами: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Архангельск, 2013. 15 с.
5. Кузнецов А. В. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность операций первичного транспорта леса: Дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск, 2003. 169 с.
6. Курьянов В. К. Повышение эксплуатационно-экологического качества уровня лесовозного автомобильного транспорта: Дис. … д-ра техн. наук. Воронеж, 1992. 509 с.
7. Лукашевич В. М. Обоснование комплектов и режимов работы лесосечных и лесотранспортных машин с учетом сезонности лесозаготовительных работ: Дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 150 с.
8. Ляхов С. В. Повышение эффективности вывозки лесоматериалов парком автопоездов на основе планирования технико-эксплуатационных показателей: Дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург, 2012. 166 с.
9. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2012. 944 с.
10. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Пладов А. В. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 304 с
11. Щеголева Л. В. Модели и методы оптимизации систем машин для сквозных процессов заготовки круглых лесоматериалов: Дис. … д-ра техн. наук. Петрозаводск, 2011. 288 с.

Ivanova O. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODELS OF HAULING RIGS' FORMATION

The article is concerned with the problem of logging trucks' fleet formation for a complete or partial renovation of the existing hauling rigs and formation of the vehicle fleet used for timber removal. Mathematical models substantiating the algorithm of lumber trucks' fleet formation based on the maintenance costs per car-shift and values of the effective output per shift are developed. Solution algorithm with the use of dynamic programming method is presented. The obtained results will help logging operators to form a park of the hauling rigs with minimal expenses on its maintenance. Special features of the applied technologies used during removal are considered. Practical application of the proposed models will significantly improve technical and economic performance of the logging company

Key words: maintenance cost, lumber trucks' fleet, mathematical model, cubic capacity, output per shift

REFERENCES

1. Introduction to Algorithms / T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. MIT Press and McGraw-Hill, 2001.
2. Burmistrova O. N. Povyshenie transportno-ekspluatatsionnykh kachestv lesovoznykh avtomobil'nykh dorog: dlya usloviy Respubliki Komi: Dis. … kand. tekhn. nauk [Rise of transport and exploitation qualities of timber roads: for conditions of Komi Republic. Ph D thesis in Technical Sciences]. Voronezh, 2001. 234 p.
3. Voronov R. V. Vvedenie v metody resheniya kombinatornykh optimizatsionnykh zadach [Introduction to methods of solving of combinatorial optimization problems]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2006. 34 p.
4. Krupko A. M. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov transportnogo osvoeniya lesnykh uchastkov lesovoznymi avtopoezdami. Avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk [Refinement of technological processes of transport absorption of forest lots by landing road-trains. Author's abstract of Ph D thesis in Technical Sciences]. Arkhangel'sk, 2013. 15 p.
5. Kuznetsov A. V. Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy, povyshayushchikh effektivnost' operatsiy pervichnogo transporta lesa: Dis… kand. tekhn. nauk [Substantiation of technological solutions raising effectiveness of operations of primary timber transport. Ph D thesis in Technical Sciences]. Petrozavodsk, 2003. 170 p.
6. Kur'yanov V. K. Povyshenie ekspluatatsionno-ekologicheskogo kachestva urovnya lesovoznogo avtomobil'nogo transporta. Dis. … d-ra tekhn. nauk [Rise of transport and ecological qualities of timber transport. Doctoral dissertation in Technical sciences.]. Voronezh, 1992. 509 p.
7. Lukashevich V. M. Obosnovanie komplektov i rezhimov raboty lesosechnykh i lesotransportnykh mashin s uchetom sezonnosti lesozagotovitel'nykh rabot: Avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk [Substantiation of packages and modes of work of stump-to-roadside equipment considering seasonality of forest harvesting operations. Author's abstract of Ph D thesis in Technical Sciences]. Petrozavodsk, 2007. 16 p.
8. Lyakhov S. V. Povyshenie effektivnosti vyvozki lesomaterialov parkom avtopoezdov na osnove planirovaniya tekhniko-ekspluatatsionnykh pokazateley. Dis. … kand. tekhn. nauk [Rise of effectiveness of forwarding by logging trucks on the ground of planning exploitation indexes Ph D thesis in Technical Sciences]. Ekaterinburg, 2012. 166 p.
9. Walkenbach J. Excel 2010 Power Programming with VBA. Wiley, 2010. 1080 p.
10. Shegel'man I. R., Skrypnik V. I., Kuznetsov A. V., Pladov A. V. Vyvozka lesa avtopoezdami. Tekhnika. Tekhnologiya. Organizatsiya [Forwarding by logging trucks. Technique. Technology. Organisation]. St. Petersburg, PROFIKS Publ., 2008. 304 p.
11. Shchegoleva L. V. Modeli i metody optimizatsii sistem mashin dlya skvoznykh protsessov zagotovki kruglykh lesomaterialov: Avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk [Models and methods of optimization of systems of machines through processes of round timber logging. Author's abstract of Ph D thesis in Technical Sciences]. Petrozavodsk, 2011. 42 p.

Поступила в редакцию 27.05.2013

Июнь, № 4 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 513.71+547.821+547.831

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ
доктор химических наук, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
andreev@psu.karelia.ru

ИЗУЧЕНИЕ ГИБРИДИЗАЦИИ АТОМА КИСЛОРОДА В КОМПЛЕКСАХ n, v-ТИПА МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА, ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА И ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

Методами ^{1}H-ЯМР-спектроскопии и РСА показано, что пространственная структура, а также тип гибридизации (sp^2 или sp^3) атома кислорода N-оксидной группы в молекулярных комплексах n, v-типа гетероароматических N-оксидов с BF_3 и другими кислотами Льюиса зависят от электронных факторов заместителей в гетероцикле, типа растворителя и пространственных напряжений, возникающих в процессе комплексообразования. Например, в хлороформе и ДМСО в аддукте N-оксида 4-метилпиридина с трифторидом бора связь О–В лежит в плоскости пиридинового кольца (sp^2-гибридизация), а в кристаллическом состоянии двугранный угол между плоскостями, проходящими через атомы N–O–B и пиридинового кольца, составляет 87,81° (sp^3-гибридизация). По-видимому, гибридное состояние атома кислорода в комплексах n, v-типа карбонильных соединений (альдегидов, кетонов, карбоновых кислот и их функциональных производных) обусловлено теми же причинами.

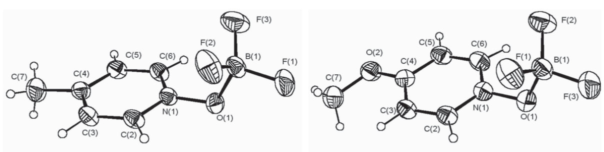
Ключевые слова: гибридизация, координация, гетероароматические N-оксиды, рентгеноструктурный анализ, нуклеофильное замещение, ядерный магнитный резонанс

Общепринято считать, что кислород в N-оксидной группе гетероароматических N-оксидов находится в состоянии sp^2-гибридизации [2], [3], [5] и в сопряжении с гетероароматическим ядром. Однако в молекулярных комплексах N-оксидов пиридинов с BF_3 состояние гибридизации атома кислорода, по-видимому, может зависеть от природы заместителей в ароматическом кольце. Так, нами обнаружено, что в ^{1}H-ЯМР-спектрах борфторидов N-оксидов 4-хлорпиридина, пиридина и 4-метилпиридина в $CDCl_3$ и DMSO-d_6 все протоны пиридинового кольца имеют различные химические сдвиги, но в комплексах более оснóвных N-оксидов 4-метоксипиридина и 4- (4-диметиламиностирил) пиридина протоны $H^{2,6}$ и $H^{3,5}$ попарно «эквивалентны». Этот феномен, на наш взгляд, хорошо объясним с точки зрения различной гибридизации атома кислорода, образующего связь с атомом бора в этих комплексах: *sp*^{2} – в первых трех случаях и *sp*^{3} – в остальных двух [6].

Очевидно, что при образовании одинарной связи между атомом азота пиридинового кольца и атомом кислорода, находящимся в состоянии *sp*^{3}-гибридизации, быстрые (во временных рамках ЯМР-спектроскопии) конформационные (вращение относительно связи N–O) изменения молекулы приведут к усреднению химических сдвигов протонов $H^{2,6}$ и $H^{3,5}$ (как в случае тетрафенилбората 1-диметилкарбамоилокси-4- (4-метоксистирил) пиридиния [11]).

Тем не менее однозначный вывод о возможности $sp^2 \rightarrow sp^3$ перегибридизации атома кислорода при взаимодействии гетероароматических N-оксидов с трифторидом бора можно сделать только на основании данных рентгеноструктурного анализа.

С этой целью в 2007 году [1] методом монокристального РСА мы исследовали атомно-молекулярную структуру комплексов N-оксидов 4-метил- и 4-метоксипиридина с BF_3 (4-MePyO · BF_3 (I) и 4-MeOPyO · BF_3 (II)), полагая, что в соответствии с данными протонного магнитного резонанса в первом случае атом бора будет находиться в плоскости пиридинового кольца, а во втором нет. Однако оказалось (рис. 1), что в кристаллах аддуктов (I и II) валентные углы N–O–B (113,95 (15)° и 113,26 (16)°), а также двугранные углы между плоскостями, проходящими через атомы N–O–B и пиридинового кольца (87,81° и 87,63°), очень близки. Подобное расположение связей O–B однозначно указывает на невозможность сопряжения атома кислорода N-оксидной группы с гетероароматическим кольцом, то есть на его sp^3-гибридное состояние в кристаллах обоих соединений.



(I) (II)

Рис. 1. Молекулы комплексов N-оксидов 4-метилпиридина (I) и 4-метоксипиридина (II) с BF_3, эллипсоиды смещения изображены с вероятностью 50 %

Указанный факт находится в соответствии с данными ^1H ЯМР-спектроскопии в $CDCl_3$ и DMSO-d_6 для комплекса 4-MeOPyO · BF_3 (попарная равноценность протонов $H^{2,6}$ и $H^{3,5}$) и не согласуется с наличием четырех типов протонов в пиридиновом кольце 4-MePyO · BF_3.

Это кажущееся противоречие, по-видимому, объясняется тем, что устойчивость и пространственная структура аддукта с BF_3 менее основного N-оксида 4-метилпиридина (pK_a [18]: 4-MePyO 1,29, 4-MeOPyO 2,05) в большей степени зависит от природы и агрегатного состояния окружающих его молекул. Если в жидкой фазе (sp^2-гибридизация атома кислорода) конформация комплекса (I) определяется и свойствами (дипольный момент, диэлектрическая проницаемость и т. д.) растворителя (сольватация и диссоциация являются динамическими процессами), то в твердой (sp^3-гибридизация) – совокупностью внутри- и межмолекулярных взаимодействий атомов кристалла, находящихся в стационарном состоянии. По-видимому, при переходе из кристаллического состояния в раствор возрастание диэлектрической проницаемости растворителя должно ослаблять прочность связи O–B и увеличивать возможность сопряжения атома кислорода с пиридиновым кольцом, формируя координационную связь за счет sp^2-гибридной орбитали (при полном разрыве связи образуется N-оксид, в котором атом кислорода находится в sp^2-гибридном состоянии). Действительно, ^1H ЯМР-спектры комплекса низкоосновного (pK_a 0,36 [13]) N-оксида 4-хлорпиридина из-за его диссоциации мы были вынуждены снимать [6] при добавлении к раствору лиганда избытка эфирата BF_3.

В данном случае можно провести аналогию с бензойными кислотами (представив их как донорно-акцепторные комплексы бензоат-анионов с протоном), которые при диссоциации в растворе образуют карбоксилат-анионы, содержащие два равноценных атома кислорода в sp^2-гибридном состоянии. При этом повышение электронодонорных свойств заместителя в ароматическом кольце, уменьшение полярности растворителя и увеличение концентрации кислоты должно ослаблять диссоциацию последней с образованием межмолекулярной водородной связи (димеры). В виде плоских димеров бензойные кислоты существуют и в твердой фазе (например, 4-метокси-, 4-метил- и 4-нитропроизводные [12]; CSD refcode: ANISIC02, PTOLIC, NBZOAC02), что указывает на sp^2-гибридное состояние всех четырех атомов кислорода.

Однако равновесные процессы образования аддуктов с участием, например, 4-метилбензоат-аниона или N-оксида 4-метилпиридина, с одной стороны, и протона или BF_3 (кислоты Льюиса), с другой стороны, похожи (различие в заряде и размере донора и акцептора). Поэтому можно сделать вывод, что sp^2-гибридизации атома кислорода (более слабая координационная связь) должны благоприятствовать ослабление основности донора и кислотных свойств акцептора. Действительно, комплексы N-оксида 4-нитропиридина (pK_a – 1,7 [1]) с 4-нитрофенолом и 4-нитробензойной кислотой (рис. 2а, 2б) в кристаллическом состоянии являются почти плоскими с углами N–O–H (между N-оксидной и гидроксильной группами) около 122°. Кроме того, с альдегидами, кетонами и сложными эфирами (очень слабые основания Льюиса, рис. 2г–е), содержащими карбонильную группу, сопряженную со стирильными и/или винильными фрагментами, даже сильная кислота Льюиса трифторид бора в кристалле образует аддукты (JADBEW, MOZCAF, MOZCEJ, MOZCIN, RUGYEX, VUSRAC), в которых атом бора находится в плоскости сопряженной системы, а валентные углы C–O–B составляют 124–127°. В комплексах диметилформамида с BBr_3 (RUGXUM) и BI_3 (RUGYAT) фрагмент B-O-CH-NC_2 также является плоским. Таким образом, в этих соединениях атомы кислорода групп N→O и C=O образуют донорно-акцепторные связи с помощью sp^2-гибридных орбиталей.

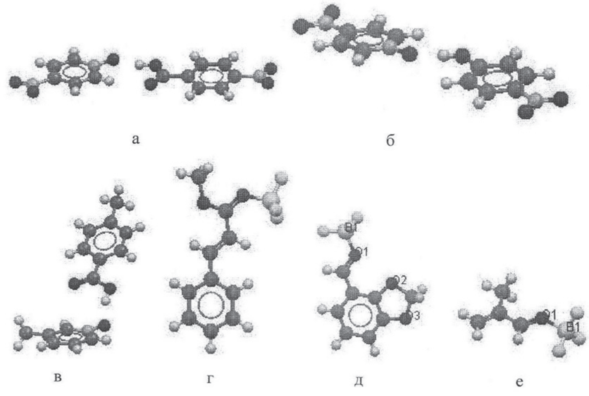


Рис. 2. Строение комплексов N-оксидов 4-нитропиридина с 4-нитробензойной кислотой (CUZDAC) (а) и 4-нитрофенолом (JUDNAX) (б), N-оксида 3-метилпиридина с 4-метилбензойной кислотой (ROKQAJ) (в), метилового эфира коричной кислоты (MOZCAF) (г), 2,3-метилендиоксибенз-альдегида (RUGYEX) (д) и 2-метилпропеналя-2 (VUSRAC) (е) с трифторидом бора согласно данным РСА [12]). Только в случае (в) атом кислорода находится в состоянии sp^3-гибридизации

С другой стороны, комплексы N-оксида 3-метилпиридина (pK_a – 1,08 [1]; гораздо более сильное основание, чем N-оксид 4-нитропиридина) с 4-метилбензойной кислотой (ROKQAJ, рис. 2в) и N-оксидов 4-нитропиридина (MUFZUJ [15]) и хинолина (MUFZET [15]) с сильной кислотой Льюиса BF_3 образуют координационную связь с участием атома кислорода в состоянии sp^3-гибридизации. Тот факт, что углы между плоскостями пиридинового кольца и связей N–O–H в первом случае и N–O–B во втором и третьем составляют, соответственно, 53,49, 75,69 и 78,43°, полностью исключает возможность сопряжения атома кислорода с ароматической системой.

В полученных нами комплексах 4-MePyO · BF_3 (I) и 4-MeOPyO · BF_3 (II) длины связей N–O (1,372 (2); 1,370 (2)) и O–B (1,496 (3); 1,502 (3)) находятся в соответствии с данными для других комплексов гетероароматических N-оксидов n, v-типа [5]; для аддуктов N-оксидов 4-нитропиридина и хинолина с трифторидом бора они составляют: 1,368 (3) и 1,370 (3) Å (N–O), 1,524 (5) и 1,513 (3) (O–B) [15]. Тетракоординированный (sp^3-гибридизация) атом бора в комплексах (I и II) образует валентные углы F–B–F 110–113°.

При этом существенный вклад в упаковку (рис. 3) молекул может быть обусловлен π–π и диполь-дипольным взаимодействием расположенных попарно и параллельно друг другу пиридиновых колец комплексов.

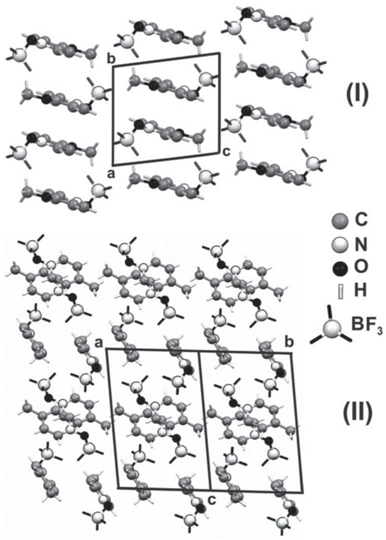


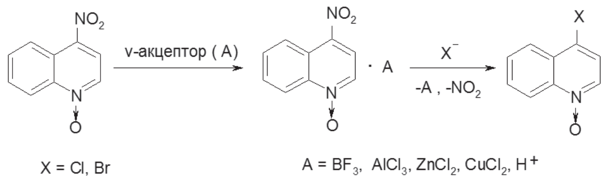
Рис. 3. Упаковка молекул в кристаллической структуре молекулярных комплексов N-оксидов 4-метилпиридина (I) и 4-метоксипиридина (II) с BF_3

Подчеркнем, что другие подобные BF_3 кислоты Льюиса ($FeCl_3$, $TlCl_3$, $TlBr_3$, TLI_3 и т. д.), в отличие от него, способны образовывать комплексы с двумя молекулами N-оксидов пиридинов (IJIYIJ, CYPOTL10, DEPHAH, COHMIV), в которых молекулы акцепторов являются плоскими, а координационная связь образуется за счет атома кислорода в sp^3-гибридном состоянии (двугранный угол C_5N-O-металл составляет 50–82°).

Особый интерес с точки зрения органической химии представляют комплексы BF_3 с N-оксидами 4-нитропиридина и 4-нитрохинолина, поскольку их образование облегчает нуклеофильное замещение группы NO_2 [7].

Обычно реакции S_N в ряду N-оксидов пиридинов и хинолинов со слабыми нуклеофилами (галогенид-ионами) требуют кипячения с концентрированными водными растворами HCl или HBr либо использования галогенангидридов уксусной кислоты или фосфорилгалогенидов и в ряде случаев сопровождаются побочными процессами, например образованием продуктов дезоксидирования [17].

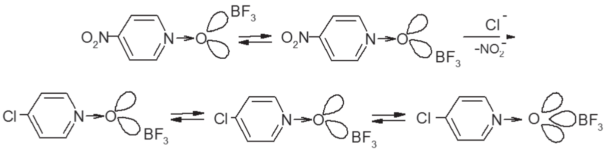
Мы обнаружили, что при добавлении BF_3 · Et_2O в реакционную среду, содержащую N-оксид 4-нитрохинолина (или использовании твердого аддукта N-оксида с BF_3), и триэтилбензиламмоний хлорида (источник хлорид-иона) в безводном ацетонитриле реакция замещения нитрогруппы на атом хлора и в первом, и во втором случаях заканчивается за одно и то же время (при комнатной температуре за 1 ч, при 65 °С за 30 мин [7]). Это указывает на участие в нуклеофильном замещении молекулярного комплекса с BF_3, в котором за счет связывания с v-акцептором увеличивается электрофильность N-оксида.



В работе [15] приводятся константы устойчивости (К) молекулярных комплексов N-оксидов 4-нитропиридина и 4-нитрохинолина с BF_3 в ацетонитриле (4-NO_2PyO · BF_3 2800 M^{-1}, 4-NO_2QO · BF_3 1700 M^{-1}), численные значения которых вызывают некоторое удивление. Ввиду того что N-оксид 4-нитропиридина (pK_a – 1,7) является более слабым основанием [1], чем N-оксид 4-нитрохинолина [pK_a – 1,39], он должен образовывать менее устойчивые комплексы с v-акцепторами. Кроме того, данные работ [1], [7] о гораздо более высокой скорости замещения нитрогруппы на атомы галогена в комплексе N-оксида 4-нитрохинолина с трифторидом бора по сравнению с пиридиновым аналогом также указывают на большее смещение электронной плотности в процессе координации из ароматической системы к атому бора, благоприятствующее образованию донорно-акцепторной связи O–B.

Для того чтобы подтвердить правомерность наших сомнений, мы определили, как описано в работе [8], значения констант устойчивости комплексов состава 1:1 цинк-тетрафенилпорфина (значительно более слабого акцептора, чем трифторид бора) с этими лигандами в хлороформе при 25 °С. Как и ожидалось, в нашем случае порядок изменения констант устойчивости комплексов с 4-NO_2PyO и 4-NO_2QO находится в согласии с величинами основности лигандов и значения К составляют, соответственно, 134 ± 3 и 267 ± 9 M^{-1}, то есть N-оксид 4-нитрохинолина является более сильным нуклеофилом (электронодонором) в процессах координации.

Подчеркнем, что для очень слабых оснований 4-NO_2PyO и 4-NO_2QO комплексы с BF_3 должны быть еще менее устойчивыми, чем с N-оксидом 4-хлорпиридина, и в растворах процесс $sp^2 \rightarrow sp^3$-перегибридизации атома кислорода группы N→O в этих двух соединениях, с нашей точки зрения, вряд ли происходит в значительной степени, но его вероятность возрастает с уменьшением электроноакцепторных (увеличением электронодонорных) свойств заместителя в пиридиновом кольце, как это показано для реакции нуклеофильного замещения нитрогруппы на атом хлора в апротонных растворителях типа хлороформа и ацетонитрила.



Ранее подобным же образом (на начальном этапе реакции N-оксидов пиридинов с иодистым метилом наиболее вероятно образование связи с участием хорошо доступной sp^2-гибридной, а не участвующей в сопряжении с пиридиновым кольцом p-орбитали атома кислорода) нам удалось объяснить аномальное влияние стерических факторов при взаимодействии N-оксидов пиридинов с алкилгалогенидами [3].

Образование активированного комплекса $[XC_5H_5N \rightarrow O^{\delta-} \cdot\cdot\cdot {}^{\delta+}CH_3 \cdot\cdot\cdot I^{\delta-}]^{\neq}$ между иодистым метилом и производным N-оксида пиридина можно представить как равновесный процесс, константа диссоциации которого будет зависеть от относительной термодинамической устойчивости исходных соединений и продуктов реакции. В свою очередь, прочность связи O–C должны увеличивать электронодонорные и уменьшать акцепторные заместители X. Действительно, согласно работе [10], при растворении в ацетонитриле метоксипиридиний иодида, полученного препаративно, происходит накопление N-оксида пиридина и иодистого метила, а концентрация иодид-иона уменьшается и достигает такого же значения, как и при образовании соли из исходных реагентов, взятых в соответствующих концентрациях. Прибавление тетраметиламмоний иодида в реакционную систему после установления равновесия увеличивает концентрацию метилиодида (эффект одноименного иона).

Появление же электронодонорных групп в пиридиновом кольце N-оксида должно сначала приводить к упрочению связи O–C, образованной sp^2-гибридной орбиталью кислорода, а затем к перегибридизации атома кислорода и образованию связи O–C за счет его sp^3-гибридной орбитали. Поэтому в случае высокоосновных N-оксидов 4-метокси- и 4-диметиламинопиридинов равновесие практически нацело смещено в сторону образования алкоксипиридиниевых солей [2].

Устойчивость ацил- (как и алкокси-) производных N-оксидов пиридинов в растворах зависит от донорно-акцепторных свойств заместителей в пиридиновом кольце и при атоме кислорода, а также природы (нуклеофильности/основности) аниона. Если тетрафенилборат 1-диметилкарбамоилокси-4- (4-метоксистирил) пиридиния [11] стабилен в апротонных растворителях, то твердый безводный продукт взаимодействия N-оксида пиридина с бензоилхлоридом даже в бензоле распадается практически полностью на исходные реагенты [9].

В твердом же состоянии (подобно молекулярным комплексам N-оксидов пиридинов с BF_3) все соли N-алкокси-, N-арилокси- и N-гетерилоксипиридиния, для которых расшифрована структура методом РСА (CANTIU, SIRWUL, TAJPUP и др.), содержат атом кислорода в состоянии sp^3-гибридизации, так как в их конформациях атомы фрагмента N-O-C находятся в плоскости, перпендикулярной к плоскости пиридинового кольца, полностью исключая возможность сопряжения между ним и атомом кислорода.

Следует отметить, что, в отличие от гетероароматических N-оксидов (sp^2-гибридизация атома кислорода), в анилинах состояние гибридизации атома азота, согласно данным РСА [4], зависит от электронных эффектов заместителей в бензольном кольце: электронодонорные группы благоприятствуют sp^3-гибридизации, а акцепторные – sp^2.

В дальнейшем мы предполагаем привлечь для исследования молекулярных комплексов N-оксидов с v-акцепторами метод газовой электронографии, так как полученные результаты могут дать дополнительную информацию о влиянии межмолекулярных взаимодействий на процесс $sp^2 \rightarrow sp^3$ перегибридизации атома кислорода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

N-оксиды 4-метилпиридина и 4-метоксипиридина были получены, как описано в работах [14], [16]. Их молекулярные комплексы с трифторидом бора (I) и (II) готовили добавлением эквимолярных количеств $BF_3 \cdot Et_2O$ к насыщенным ацетоновым растворам соответствующих N-оксидов. Выпавшие бесцветные кристаллы высушивали на воздухе. 4-MePyO · BF_3 Т. пл. 125–127 °C, 4-MeOPyO · BF_3 Т. пл. 116–117 °C. ^{1}H ЯМР-спектры [6] записаны на спектрометре Bruker WM 400 (400 МГц) в DMSO-d_6.

Структурные данные депонированы в Кембриджском банке структурных данных (КБСД) – CCDC 848664 и 848665.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития на 2012–2016 годы «Университетский комплекс ПетрГУ в научно-образовательном пространстве Европейского Севера: стратегия инновационного развития», подпроект «Создание и развитие деятельности Междисциплинарной и межкафедральной лаборатории по разработке перспективных материалов на основе нанокомпозитов с использованием природных соединений», а также гранта Правительства Российской Федерации по Постановлению № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 11.G34.31.0052 от 19 октября 2011 г., заключенному между Минобрнауки России, ведущим ученым А. Н. Полтораком и Петрозаводским государственным университетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П. Молекулярные комплексы гетероароматических N-оксидов и ацетиленовых аминов с v-акцепторами как модель исследования нуклеофильности и основности соединений с пространственно доступными реакционными центрами: Дис. … д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2007. 427 с.
2. Андреев В. П. Относительная нуклеофильная реакционная способность пиридинов и пиридин-N-оксидов («супернуклеофильность» пиридин-N-оксидов) // ЖОрХ. 2009. Т. 45. № 7. С. 1073–1082.
3. Андреев В. П. Влияние электронных факторов на реакционную способность гетероароматических N-оксидов // ХГС. 2010. № 2. С. 227–242.
4. Андреев В. П. Гибридизация атомов азота в анилинах и их молекулярных комплексах с v-акцепторами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 6 (127). С. 82–86.
5. Андреев В. П., Вапиров В. В., Нижник Я. П., Алешина Л. А., Семенова Т. А. Изменение гибридизации атома кислорода группы N→O при комплексообразовании N-оксидов пиридинов и хинолинов с v-акцепторами // ЖОрХ. 2008. Т. 78. Вып. 5. С. 830–840.
6. Андреев В. П., Нижник Я. П. Исследование комплексообразования N-оксидов пиридинов и хинолинов с трифторидом бора методом протонного магнитного резонанса // Координационная химия. 2007. Т. 33. № 9. С. 703–708.
7. Андреев В. П., Рыжаков А. В. Активация v-акцепторами реакций нуклеофильного замещения в N-оксиде 4-нитрохинолина // ХГС. 1999. № 11. С. 1523–1527.
8. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Ремизова Л. А., Тунина С. Г. Координация Zn-ТФП с первичными аминами и со спиртами в хлороформе // ЖОХ. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 1023–1033.
9. Литвиненко Л. М., Олейник Н. М. Механизмы действия органических катализаторов. Основный и нуклеофильный катализ. Киев: Наукова думка, 1984. 264 с.
10. Попов А. Ф., Матвеев А. А., Коблик И. В., Савелева В. А., Матвиенко В. Н. Кинетика и продукты реакции пиридин-N- оксидов с галогеналканами // ЖОрХ. 1996. Т. 32. Вып. 4. С. 609–612.
11. Шредер Г., Рыбаченко В. И., Чотий К. Ю., Коваленко В. В., Гребенюк Л. В., Ленска Б., Эйтнер К. Константы скорости и равновесия переноса диметилкабамоильной группы между N-оксидами пиридина // ЖОХ. 2003. Т. 73. Вып. 3. С. 486–493.
12. Allen F. H. Acta Crystallogr., Sect. B. // Structural Science. 2002. Vol. 58. P. 380. Cambridge Structural Database [Electronic resource]. Access mode: http://www.ccdc.cam.ac.uk
13. Dega-Szafran Z., Grundwald-Wyspianska M., Kania A., Kosturkiewicz Z., Szafran M., Tykarska E. FT-IR, UV-visible and X-ray studies of complexes of pyridine N-oxides with pentachlorophenol // J. Mol. Structure. 1995. Vol. 356. P. 169–182.
14. Katritzky A. R. The preparation of some substituted pyridine 1-oxides // J. Chem. Soc. 1956. № 7. P. 2404–2408.
15. Nizhnik Ya. P., Lu J., Rosokha S. V., Kochi J. K. Lewis acid effects on donor-acceptor associations and redox reactions: ternary complexes of heteroaromatic N-oxides with boron trifluoride and organic donors // New J. Chem. 2009. Vol. 33. P. 2317–2325.
16. Ochiai E. Recent Japanese work on the chemistry of pyridine 1-oxides and related compounds // J. Org. Chem. 1953. Vol. 18. № 5. P. 534–551.
17. Ryzhakov A. V., Andreev V. P., Rodina L. L. Molecular complexes of heteroaromatic N-oxides and their reactions with nucleophiles // Heterocycles. 2003. Vol. 60. № 2. P. 419–435.
18. Szafran M., Brycki B., Dega-Szafran Z., Nowak-Wydra B. Differantiation of substituent effects from hydrogen bonding and protonation effects in carbon-13 NMR spectra of pyridine N-oxides // J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2. 1991. Vol. 8. P. 1161–1166.

Andreev V. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

INVESTIGATION OF HYBRIDIZATION OF OXYGEN ATOM IN n, v-TYPE COMPLEXES BY METHODS OF X-RAY ANALYSIS, NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE, AND ELECTRONIC SPECTROSCOPY

The ^{1}H NMR and X-ray analysis proved that the space structure and hybridization type (sp^2 or sp^3) of the oxygen atom of N-oxide group in n,v-type molecular complexes of heteroaromatic N-oxides with BF_3 and other Lewis acids depend on electronic factors of the substituents in pyridine ring, solvent type, and space bulks during complexation. For example, in $CDCl_3$ and DMSO-d_6 in adduct of 4-methylpyridine N-oxide with boron trifluoride bond O-B lies in plane of pyridine cycle (sp^2-hybridization), but in crystal dihedral the angle between planes of N–O–B atoms and pyridine ring is 87,81o (sp^3-hybridization). Perhaps hybride state of the oxygen atom in n,v-type complexes of carbonylic compounds (aldehyds, ketones, carboxylic acids and their functional derivatives) depends on the same factors.

Key words: hybridization, coordination, heteroaromatic N-oxides, X-Ray analysis, nucleophilic substitution, nuclear magnetic resonance

REFERENCES

1. A n d r e e v V. P. *Molekulyarnye kompleksy geteroaromaticheskikh N-oksidov i atsetilenovykh aminov s v-aktseptorami kak model' issledovaniya nukleofil'nosti i osnovnosti soedineniy s prostranstvenno dostupnymi reaktsionnymi tsentrami. Diss. dokt. khim. nauk* [Molecular complexes of heteroaromatic N-oxides and acetylenic amines with v-acceptors as model of investigation of nucleophylicity and strength of the compounds with free reactive centers. Dr. chim. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2007. 427 p.
2. A n d r e e v V. P. Relative Nucleophilic Reactivity of Pyridines and Pyridine N-Oxides (Supernucleophilicity of Pyridine N-Oxides) // Russian Journal of Organic Chemistry. 2009. Vol. 45. № 7. P. 1061–1069.
3. A n d r e e v V. P. The Effect of electronic factors on the reactivity of heteroaromatic N-oxides // Chemistry of Heterocyclic Compounds. 2010. Vol. 46. № 2. P. 184–195.
4. A n d r e e v V. P. Hybridization of nitrogen atom in anilines and their molecular complexes with v-acceptors [Gibridizatsiya atomov azota v anilinakh i ikh molekulyarnykh kompleksakh s v-akseptorami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Scientific Journal Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 6 (127). P. 82–86.
5. A n d r e e v V. P., V a p i r o v V. V., N i z h n i k Ya. P., A l e s h i n a L. A., S e m e n o v a T. A. Change in the Hybridization of the N→O Group Oxygen Atom upon Complex Formation of Pyridine and Quinoline N-Oxides with v-Acceptors // Russian Journal of General Chemistry. 2008. Vol. 78. № 5. P. 973–983.
6. A n d r e e v V. P., N i z h n i k Ya. P. Complexes of Pyridine and Quinoline N-Oxides with Boron Trifluoride: the ^{1}H NMR Study // Russian Journal of Coordination Chemistry. 1997. Vol. 33. № 9. P. 692–697.
7. A n d r e e v V. P., R y z h a k o v A. V. Activation of nucleophylic substitution reactions in 4-nitroquinoline N-oxide by v-acceptors // Chemistry of Heterocyclic Compounds. 1999. Vol. 35. № 11. P. 1329–1333.
8. A n d r e e v V. P., S o b o l e v P. S., Z a i t s e v D. O., R e m i z o v a L. A., T u n i n a S. G. Tetraphenylporphine zinc (II) Coordination with Primary Amines and Alcohols in Chloroform // Russian Journal of General Chemistry. 2012. Vol. 82. № 6. P. 1157–1166.
9. L i t v i n e n k o L. M., O l e y n i k N. M. *Mekhanizmy deystviya organicheskikh katalizatorov. Osnovnyy i nukleofil'nyy kataliz* [Action mechanism of organic catalysts. Basic and acidic catalysis]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1984. 264 p.
10. P o p o v A. F., M a t v e e v A. A., K o b l i k I. V., S a v e l e v a V. A., M a t v i e n k o V. N. Kinetics and products of pyridine-n-oxide reaction with haloalkanes [Kinetika i produkty reaktsii piridin-N-oksidov s galogenalkanami]. *Zhurnal organicheskoy khimii* [Journal of Organic Chemistry]. 1996. Vol. 32. № 4. P. 609–612.
11. S c h r o e d e r G., R y b a c h e n k o V. I., C h o t i i K. Yu., K o v a l e n k o V. V., G r e b e n y u k L. V., L e n s k a B., E i t n e r K. Rate and Equilibrium Constants of Dimethylcarbamoyl Transfer between Pyridine N-Oxides // Russian Journal of General Chemistry. 2003. Vol. 73. № 3. P. 455–462.
12. A l l e n F. H. Acta Crystallogr., Sect. B. // Structural Science. 2002. Vol. 58. P. 380. Cambridge Structural Database. Available at: http://www.ccdc.cam.ac.uk
13. D e g a - S z a f r a n Z., G r u n d w a l d - W y s p i a n s k a M., K a n i a A., K o s t u r k i e w i c z Z., S z a f r a n M., T y k a r s k a E. FT-IR, UV-visible and X-ray studies of complexes of pyridine N-oxides with pentachlorophenol // J. Mol. Structure. 1995. Vol. 356. P. 169–182.
14. K a t r i t z k y A. R. The preparation of some substituted pyridine 1-oxides // J. Chem. Soc. 1956. № 7. P. 2404–2408.
15. N i z h n i k Ya. P., Lu J., R o s o k h a S. V., K o c h i J. K. Lewis acid effects on donor-acceptor associations and redox reactions: ternary complexes of heteroaromatic N-oxides with boron trifluoride and organic donors // New J. Chem. 2009. Vol. 33. P. 2317–2325.
16. O c h i a i E. Recent Japanese work on the chemistry of pyridine 1-oxides and related compounds // J. Org. Chem. 1953. Vol. 18. № 5. P. 534–551.
17. R y z h a k o v A. V., A n d r e e v V. P., R o d i n a L. L. Molecular complexes of heteroaromatic N-oxides and their reactions with nucleophiles // Heterocycles. 2003. Vol. 60. № 2. P. 419–435.
18. S z a f r a n M., B r y c k i B., D e g a - S z a f r a n Z., N o w a k - W y d r a B. Differentiation of substituent effects from hydrogen bonding and protonation effects in carbon-13 NMR spectra of pyridine N-oxides // J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2. 1991. Vol. 8. P. 1161–1166.

Поступила в редакцию 27.02.2013

Июнь, № 4 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 537.312.9:621.315.59

АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ВЕЛИЧКО
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
velichko@petrsu.ru

АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ ЧЕРЕМИСИН
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexiii1982@mail.ru

ВАДИМ АНДРЕЕВИЧ КУРОПТЕВ
аспирант, преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuroptev@petrsu.ru

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gstef@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АНОДНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ*

Одним из перспективных способов управления фазовым переходом металл – изолятор в оксидных материалах, открывающих доступ к его практическому использованию, является приложение давления или механических напряжений. В работе исследуется влияние одноосного давления на параметры электронного переключения в тонкопленочных сэндвич-структурах на основе анодного оксида ванадия. В полученных образцах зафиксирован эффект переключения с S-образной вольт-амперной характеристикой, исследована зависимость пороговых напряжений включения и выключения от приложенного давления. Показано, что пороговое напряжение переключения (и, соответственно, температура перехода металл – изолятор) уменьшается с ростом давления. Полученные результаты сопоставлены с аналогичными для структур на основе ксерогеля $V_2O_5 \times nH_2O$. Обсуждена возможность использования обнаруженного эффекта для разработки тонкопленочных микросенсоров температуры и механических напряжений.

Ключевые слова: переход металл – изолятор, одноосное сжатие, анодные оксиды ванадия

Исследования влияния давления и механических напряжений на фазовый переход металл – изолятор (ПМИ) в диоксиде ванадия являются весьма информативными с точки зрения определения механизма перехода [2], [8], [10], [12], [14]. С другой стороны, возможность управлять свойствами материала с ПМИ (например, изменяя температуру фазового перехода T_t под действием давления) представляет интерес для возможных технических приложений, в частности в микроэлектромеханических системах (МЭМС). Необходимо отметить, что имеющиеся в литературе [2], [8], [14] данные о зависимости параметров ПМИ в VO_2 от P достаточно противоречивы. Величина и даже знак $\frac{\partial T_t}{\partial P}$ существенным образом зависят от качества образцов (пленки, монокристаллы) и способа измерения (всестороннее или одноосное сжатие) [8], [14]. Кроме того, исследование зависимости T_t от P является важным для понимания механизмов изоструктурных кристаллографических переходов в полупроводниковой моноклинной (M1–M2) фазе VO_2 [11].

В сэндвич-структурах V–VO_2-металл на основе анодных пленок оксида ванадия наблюдается эффект переключения с S-образной вольт-амперной характеристикой [6], [13], характеризующейся пороговыми напряжениями включения U_{th} и выключения U_{off} (рис. 1). Эффект отрицательного дифференциального сопротивления также потенциально перспективен для создания различных электронных устройств: переключателей, генераторов, чувствительных

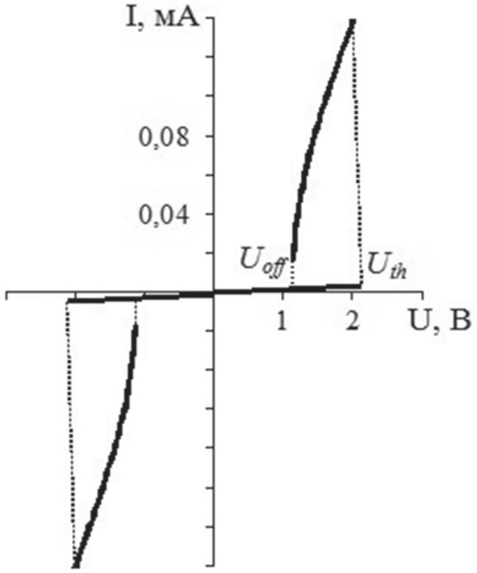


Рис. 1. ВАХ исследуемой структуры
металл / анодная окисная пленка ванадия / металл

элементов сенсорных систем и т. д. [5], [6], [7], [12]. Во многих случаях для технических приложений более перспективными оказываются именно не планарные, а сэндвич-структуры типа металл – диэлектрик – металл, что объясняется общей тенденцией к миниатюризации.

Пороговое напряжение U_{th} зависит от температуры, уменьшаясь с ростом T [6]. В сэндвич-структурах на основе VO_2 зависимость $U_{th}(T)$ удовлетворительно описывается моделью критической температуры ($U_{th} \sim \sqrt{T_t - T}$) [2] при комнатных температурах, тогда как при низких температурах переключение имеет более сложную природу [9]. Так как T_t зависит от P, то можно предположить, что U_{th} будет также зависеть от давления.

В настоящей работе мы исследовали влияние одноосного сжатия на параметры переключения в структурах на основе анодных пленок оксида ванадия. Исследуемые образцы изготавливались по методике, описанной в [13]. Давление на образец создавалось приложением нагрузки к прижимному контакту с помощью специальной электромагнитной системы [3]. Была найдена зависимость прикладываемой нагрузки *(F)* от постоянного тока, проходящего через электромагнит. Такая система позволяла реализовать прецизионное изменение и измерение давления по величине тока после соответствующей калибровки. Полная площадь контакта прижимного электрода (позолоченная проволока диаметром 0,5 мм, закругленная на конце) с поверхностью пленки была оценена по диаметру следа с помощью микроскопа [7] и составляла $S \sim 3 \cdot 10^{-10}$ м^2. Эффективное значение давления рассчитывалось как $P = \dfrac{F}{S}$.

Измеренные зависимости U_{th} и U_{off} при T = 293 K показаны на рис. 2; при $P = P_c \approx 100$ МПа переключение исчезает (ввиду разных масштабов осей ординат для U_{th} и U_{off} соответствующая точка пересечения кривых 1 и 2 не указана). Зависимость U_{th} *(P)* (рис. 2, кривая 1) качественно подобна аналогичной зависимости для сэндвич-переключателя на основе V_2O_5-геля [7], в котором переключение также обусловлено развитием ПМИ в VO_2-канале [7]. Однако количественные характеристики в этих двух случаях резко различны: в [7] $P_c \approx 1500$ МПа, то есть почти на порядок больше. По нашему мнению, это может быть связано с тем, что поверхность прижимного контакта (и в меньшей степени самой пленки) не является идеально плоской. В случае анодной пленки эффективная площадь физического контакта будет при этом несколько меньше вышеприведенной оценки *S* и реальное давление, соответственно, больше (в нашем случае в 10 раз) расчетной величины P. В отличие от плотного анодного оксида, ксерогель $V_2O_5 \times nH_2O$, являясь полимероподобным пористым материалом [1], более пластичен, что обеспечивает сплошной контакт даже со слегка шероховатой поверхностью электрода.

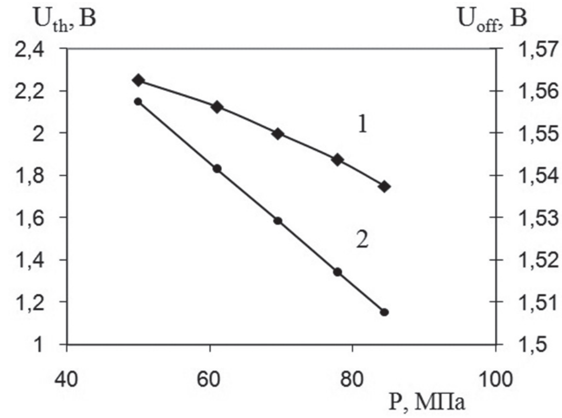


Рис. 2. Зависимость пороговых параметров ВАХ
(U_{th} – 1, U_{off} – 2) от давления *P*

Важно подчеркнуть, что с точки зрения технических приложений (например, в качестве датчиков и преобразователей механических величин в МЭМС) структуры на основе анодных пленок оксида ванадия могут оказаться в некоторых случаях более эффективными по сравнению со структурами на основе геля [7]. Дело в том, что толщина анодной пленки составляет ~ 100 нм, в отличие от типичной толщины пленки ксерогеля (1–10 мкм), что значительно увеличивает возможную плотность размещения элементов. Кроме того, отмеченная выше разница в эффективных величинах давлений имеет положительную сторону в том смысле, что эти два типа датчиков, работающие по сути на одном и том же материале (VO_2) и на одном эффекте (ПМИ), дополняют друг друга по охватываемому диапазону рабочих усилий (давлений). При этом максимальная относительная чувствительность датчика на основе анодного оксида будет выше: $\frac{1}{U_{th}} \cdot \frac{\partial U_{th}}{\partial P} \approx -7 \cdot 10^{-3}\ МПа^{-1}$ (при P = 70 МПа, см. рис. 2), тогда как для структуры на основе гидратированного пентаоксида ванадия [7] соответствующий показатель составляет $\sim -9 \times 10^{-4}$ МПа$^{-1}$ при том же давлении.

Отметим, что проблема расширения диапазона измеряемых механических напряжений (или увеличение чувствительности) путем простейшего на первый взгляд технического решения – уменьшения площади прижимного контакта и тем самым увеличения P – не является тривиальной. Дело в том, что уменьшение S ниже определенного предела приведет, очевидно, просто к прокалыванию пленки. В нашем же случае, несмотря на отмеченную выше неоднородность рельефа металлического электрода в зоне контакта, этого не происходит. Это подтверждается полной обратимостью кривых на рис. 2 и воспроизводимостью результатов для каждого образца.

В заключение отметим, что полученный результат $\frac{\partial U_{th}}{\partial P} < 0$ подтверждает данные работы [7] и свидетельствует о том, что в данных условиях для VO_2 $\frac{\partial T_t}{\partial P} < 0$ (температура ПМИ уменьшается с ростом P), что согласуется с результатами [14]. Что касается возможных технических приложений данного эффекта, то здесь следует еще раз подчеркнуть, что проблема поиска новых материалов для создания микросенсоров весьма актуальна в последнее время [5]. Зависимость пороговых характеристик сэндвич-переключателей от T и P указывает на возможность их использования в качестве тонкопленочных микросенсоров температуры и механических напряжений. Кроме того, генерация релаксационных колебаний в схемах, содержащих такие элементы, позволяет реализовать датчики с частотным выходом [5], [6], обладающие целым рядом преимуществ по сравнению с преобразователями типа «измеряемая величина → напряжение». При этом важно подчеркнуть, что разработанные методы литографии по оксидам ванадия [4] предоставляют возможность формирования сенсорных систем на основе VO_2 в микро- и наномасштабах.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 годы, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)» (государственные контракты № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 16.740.11.0562, № 14.740.11.1157, № 14.B37.21.0755, № 14.B37.21.0747, № 14.B37.21.1066), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (государственные контракты № 2.3282.2011, № 2.2774.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина О. Я., Казакова Е. Л., Пергамент А. Л., Сергеева О. В. Модификация электрических и оптических свойств тонких слоев гидратированного оксида ванадия при легировании водородом и вольфрамом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 77–85.
2. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
3. Величко А. А. Переключение в тонкопленочных микро- и наноструктурах на основе оксидов переходных металлов с переходом металл – изолятор: Дис. … канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2002. 155 с.
4. Величко А. А., Дутиков Д. А., Кулдин Н. А., Кундозерова Т. В., Параничев Д. К., Пергамент А. Л., Путролайнен В. В., Стефанович Г. Б., Черемисин А. Б. Разработка методов микро- и нанолитографии по оксидным пленкам переходных металлов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 11 (105). С. 82–94.
5. Пергамент А. Л., Казакова Е. Л., Артюхин Д. В., Ольшанников Д. И., Савченко М. В. Физические основы разработки датчиков на основе эффекта переключения в диоксиде ванадия // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 101–105.
6. Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и переключение в VO_2 в сильном электрическом поле // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 20. С. 69–73.
7. Стефанович Г. Б., Пергамент А. Л., Казакова Е. Л. Электрическое переключение в структурах металл – диэлектрик – металл на основе гидратированного пентаоксида ванадия // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 11. С. 6–12.
8. Berglund C. N., Jayaraman A. Hydrostatic-pressure dependence of the electronic properties of VO_2 near the semiconductor-metal transition temperature // Phys. Rev. 1969. Vol. 185. P. 1034–1039.
9. Gu Y., Cao J., Wu J., Chen L.-Q. Thermodynamics of strained vanadium dioxide single crystals // Journal of applied physics. 2010. Vol. 108. 083517.
10. Lazarovits B., Kim K., Haule K., Kotliar G. Effects of strain on the electronic structure of VO_2 // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. 115117.
11. Mitrano M., Maroni B. et al. Anisotropic compression in the high-pressure regime of pure and chromium-doped vanadium dioxide // Phys. Rev. B – Condensed matter and materials physics. 2012. Vol. 85. № 18. 184108.
12. Pergament A. L., Boriskov P. P., Velichko A. A., Kuldin N. A. Switching effect and the metal-insulator transition in electric field // Journal of physics and chemistry of solids. 2010. Vol. 71. P. 874–879.
13. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Velichko A. A., Stefanovich L. A. Anodic oxidation of vanadium and properties of vanadium oxide films // Journal of physics: condensed matter. 2004. Vol. 16. Is. 23. P. 4013–4024.
14. Ufert D.-K. Stress induced switching in VO_2 thin films // Phys. Stat. Solidi (a). 1976. Vol. 34. P. 1083–1086.

Velichko A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Cheremisin A. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kuroptev V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Stefanovich G. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

UNIAXIAL COMPRESSION INFLUENCE ON SWITCHING PARAMETERS OF STRUCTURES BASED ON VANADIUM ANODIC OXIDE FILMS

The application of pressure or mechanical strain is one of the promising ways to control metal-insulator transition in oxide materials, which makes its practical use possible. The article is concerned with the study of uniaxial compression influence on electronic switching parameters of the thin film sandwich structures based on vanadium anodic oxide films. The switching effect with S-shaped current-voltage characteristics was obtained for analyzed samples. Pressure dependence of the threshold on-off voltage was investigated. The study showed that the threshold voltage of switching (and, accordingly, metal-insulator transition temperature) decreases together with pressure elevation. The obtained results were compared to similar ones for structures based on xerogel $V_2O_5 \times nH_2O$. A possible use of the discovered effect to design temperature and mechanical pressure for thin film microsensors was discussed.

Key words: metal-insulator switching, uniaxial compression, vanadium anodic oxides

REFERENCES

1. Berezina O. Ya., Kazakova E. L., Pergament A. L., Sergeeva O. V. Modification of electrical and optical properties of thin layers of hydrated vanadium oxide doped with hydrogen and tungsten [Modifikatsiya elektricheskikh i opticheskikh svoystv tonkikh sloev gidratirovannogo oksida vanadiya pri legirovanii vodorodom i vol'framom]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2010. № 6 (111). P. 77–85.
2. Bugaev A. A., Zakharchenya B. P., Chudnovskiy F. A. *Fazovyy perekhod metall – poluprovodnik i ego primenenie* [Semiconductor-to-metal phase transition and its application]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 183 p.
3. Velichko A. A. *Pereklyuchenie v tonkoplenochnykh mikro- i nanostrukturakh na osnove perekhodnykh metallov s perekhodom metall – izolyator. Diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Switching in thin film micro- and nanostructures based on transitional metals' oxides with the metal-to-insulator transition. Cand. phys. and math. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2002. 155 p.
4. Velichko A. A., Dutikov D. A., Kuldin N. A., Kundozerova T. V., Paranichev D. K., Pergament A. L., Putrolaynen V. V., Stefanovich G. B., Cheremisin A. B. Development of methods micro- and nanolithography on oxide films of transitional metals [Razrabotka metodov mikro- i nanolitografii po oksidnym plenkam perehodnykh metallov]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 11 (105). P. 82–94.
5. Pergament A. L., Kazakova E. L., Artyukhin D. V., Ol'shannikov L. I., Savchenko M. V. The physical bases for the development of sensors based on the switching effect in vanadium dioxide [Fizicheskie osnovy razrabotki datchikov na osnove effekta pereklyucheniya v diokside vanadiya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 7 (101). P. 101–105.
6. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Chudnovskiy F. A. Semiconductor-to-metal phase transition and switching in VO_2 in strong electrical field [Fazovyy perekhod metall – poluprovodnik i pereklyuchenie v sil'nom elektricheskom pole]. *Pis'ma v GTF.* 1993. Vol. 19, Is. 20. P. 69–73.
7. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Kazakova E. L. Electrical switching in metal – semiconductor – metal structures based on hydrated vanadium pentaoxide [Elektricheskoe pereklyuchenie v strukturakh metall – dielektrik – metall na osnove gidratirovannogo pentaoksida vanadiya]. *Pis'ma v GTF.* 2000. Vol. 26, Is. 11. P. 6–12.
8. Berglund C. N., Jayaraman A. Hydrostatic-pressure dependence of the electronic properties of VO_2 near the semiconductor-metal transition temperature // Phys. Rev. 1969. Vol. 185. P. 1034–1039.
9. Gu Y., Cao J., Wu J., Chen L.-Q. Thermodynamics of strained vanadium dioxide single crystals // Journal of applied physics. 2010. Vol. 108. 083517.
10. Lazarovits B., Kim K., Haule K., Kotliar G. Effects of strain on the electronic structure of VO_2 // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. 115117.
11. Mitrano M., Maroni B. et al. Anisotropic compression in the high-pressure regime of pure and chromium-doped vanadium dioxide // Phys. Rev. B – Condensed matter and materials physics. 2012. Vol. 85. № 18. 184108.
12. Pergament A. L., Boriskov P. P., Velichko A. A., Kuldin N. A. Switching effect and the metal-insulator transition in electric field // Journal of physics and chemistry of solids. 2010. Vol. 71. P. 874–879.
13. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Velichko A. A., Stefanovich L. A. Anodic oxidation of vanadium and properties of vanadium oxide films // Journal of physics: condensed matter. 2004. Vol. 16, Is. 23. P. 4013–4024.
14. Ufert D.-K. Stress induced switching in VO_2 thin films // Phys. Stat. Solidi (a). 1976. Vol. 34. P. 1083–1086.

Поступила в редакцию 29.12.2012

Июнь, № 4 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 533.9

АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ШЕЛЕСТОВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shelestov@psu.karelia.ru

ВАЛЕРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ГОСТЕВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vgostev@psu.karelia.ru

ОЛЕГ ВАЛЕНТИНОВИЧ ОЛЕЩУК
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
oov@psu.karelia.ru

АНТОН СЕРГЕЕВИЧ УСТИНОВ
старший преподаватель кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
cmi06@mail.ru

СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА*

Целью данной работы являлось исследование спектров холодной плазмы, получаемой при помощи специального устройства для осуществления несамостоятельного разряда. Само исследование спектрального состава плазменного потока производилось с помощью многоканального высокоскоростного триггерного спектрометра. В качестве плазмообразующего вещества использовался воздух, пары воды, а также пары бензина. Спектры были отождествлены, на основе чего сделан ряд выводов относительно присутствия в плазме атомов углерода и возбужденных углеводородных радикалов.

Ключевые слова: плазма, плазмотрон, газовый разряд, подготовка топлива

ВВЕДЕНИЕ

Плазменные генераторы и генерируемые ими плазменные потоки благодаря своим уникальным особенностям прочно завоевали лидирующие позиции в технике и промышленности [3]. Примерами применения плазменных генераторов являются сварка и резка металлов и тугоплавких материалов, нанесение защитных покрытий на различные материалы, термическое обезвреживание высокотоксичных органических отходов, обеззараживание и стерилизация медицинских инструментов, обработка биологических объектов и др. [5]. В последнее время наблюдается все больший рост интереса к холодной плазме, получаемой при атмосферном давлении. Это связано прежде всего с особенностями работы с такой плазмой: отсутствие необходимости создания вакуума, простота ввода, вывода и обработки материала, технически приемлемые требования к источникам электропитания, невысокие эксплуатационные расходы.

Целью данной работы является проведение экспериментов по исследованию спектроскопических характеристик микроплазмотрона – генератора холодной плазмы и генерируемого им плазменного потока.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование спектрального состава плазменного потока проводилось с помощью многоканального высокоскоростного триггерного спектрометра AvaSpec-2048FT, измеренная аппаратная ширина которого составила 0,3 нм. Схема экспериментальной установки по регистрации спектров приведена на рис. 1.

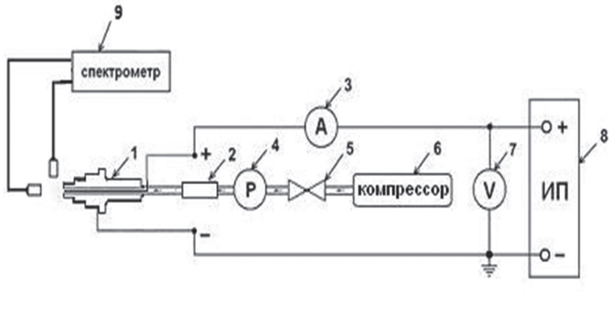


Рис. 1. Схема экспериментальной установки регистрации спектров: 1 – микроплазмотрон; 2 – барботирующее устройство; 3 – амперметр; 4 – манометр; 5 – вентиль регулирования избыточного давления; 6 – компрессор; 7 – вольтметр; 8 – источник питания; 9 – спектрометр

Регистрация спектров производилась в поперечном и продольном направлениях по отношению к плазменному потоку при напряжении *U* = 1500 В, токе разряда *I* = 25 мА и давлении *p* = 0,5 атм. В качестве рабочего вещества использовался воздух, воздух + пары воды, воздух + пары воды и бензина.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в эксперименте спектры анализировались согласно [2], [4] (рис. 2).

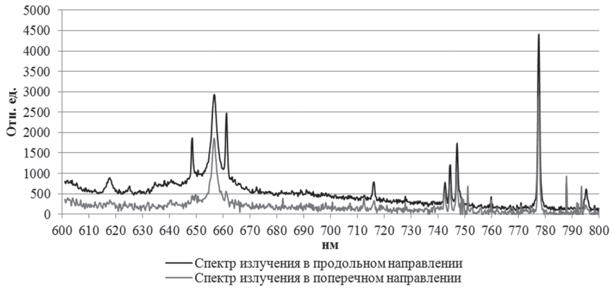


Рис. 2. Спектр излучения плазменного факела; рабочее вещество – воздух; 600–800 нм

В случае использования воздуха в качестве плазмообразующего газа в зарегистрированных спектрах были обнаружены интенсивные линии O, O^+, N, N^+, полосы молекул O_2, O_2^+, O_3, N_2, NO, а также атомарные линии элементов материала электродов [6]. Для регистрации спектров применялся аспирационный метод измерения спектра аэроинов. Спектры, зарегистрированные в продольном направлении, отличались от зарегистрированных в поперечном направлении только значением интенсивности.

В случае использования в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха и паров воды в спектрах излучения, кроме атомарных линий и молекулярных полос, зарегистрированных при использовании воздуха в качестве плазмообразующего газа, были обнаружены более интенсивные линии H_α и полоса молекулы H_2. Как и в предыдущем случае, спектры, зарегистрированные в продольном направлении, отличались от зарегистрированных в поперечном направлении только значением интенсивности.

На рис. 3, 4 приведены спектры излучения плазменного факела для рабочего вещества воздух + пары воды и бензина. При наличии в рабочем веществе паров бензина в УФ-области наблюдается присутствие в плазме атомов углерода и возбужденных углеводородных радикалов CH, CH2, CH3, электронные переходы которых лежат в области 200–280 нм. Также визуально наблюдалось значительное увеличение плазменного факела по сравнению с аналогичной величиной при использовании в качестве рабочего вещества воздуха и воздуха с парами воды.

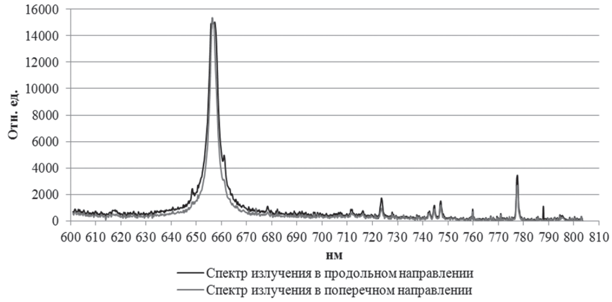


Рис. 3. Спектр излучения плазменного факела; рабочее вещество – воздух + пары воды и бензина; 600–800 нм

Рис. 4. Спектр излучения плазменного факела в ультрафиолетовой области; рабочее вещество – воздух + пары воды и бензина; 200–270 нм

ВЫВОДЫ

Со ссылкой на известный метод спектрального исследования нами были получены и отождествлены спектры излучения для нескольких плазмообразующих веществ. В результате анализа полученных спектров был сделан ряд выводов относительно присутствия в плазме атомов углерода и возбужденных углеводородных радикалов в бензино-воздушной плазмообразующей среде, а также увеличения размеров плазменного факела при использовании паров воды по сравнению с аналогичной величиной при использовании в качестве рабочего вещества воздуха. Благодаря возможности работы в условиях воздушной атмосферы, низкой среднемассовой температуре воздушно-плазменного потока, использованию воздуха в качестве плазмообразующего газа, а также наличию в потоке плазмы химически активных компонентов, в особенности экзогенного оксида азота, и интенсивному оптическому излучению в УФ-области спектра значительно расширяются возможности применения данного газоразрядного генератора в различных областях и сферах деятельности человека [1].

Одним из основных и перспективных технических применений модели созданного инжектора является его использование в качестве плазменного устройства подготовки топлива в двигателях внутреннего сгорания.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 годы, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», государственные контракты № 16.740.11.0562, 14.В37.21.0747, 14.В37.21.1066, 14.В37.21.0755, а также в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России и заказом Департамента научных и научно-педагогических кадров университету на оказание услуг № 2.3282.2011 и 2.2774.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристова Н. А., Беркутов Н. А., Пискарев И. М. Обезжелезивание шахтных вод генератором холодной плазмы // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 5. С. 50.
2. Барсуков В. И. Атомный спектральный анализ. М.: Машиностроение-1, 2005. 132 с.
3. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 576 с.
4. Осадько И. С. Селективная спектроскопия одиночных молекул. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. 320 с.
5. Подураев В. И., Татаринов Д. С., Петрова В. Д. Механическая обработка с охлажденным ионизированным воздухом // Вестник машиностроения. 1991. № 11. С. 27–31.
6. Стриганов А. Н., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 900 с.

Shelestov A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Gostev V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Oleshchuk O. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ustinov A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

SPECRTRAL RESEARCH OF PLASMA FLOW KINETICS

The purpose of this work was to research spectra of the cold plasma received by means of a special device for implementation of semiself-maintained discharge. A research of spectral distribution of plasma flow was made by means of multichannel high-speed trigger spectrometer. Air, vapors of water, and vapors of gasoline were used as plasma-forming substances. Spectra were identified. Based on the obtained data a number of conclusions concerning presence of carbon atoms and hydrocarbons in plasma were made.

Key words: plasma, plasma torch, gas discharge, preparation of fuel

REFERENCES

1. Aristova N. A., Berkutov N. A., Piskarev I. M. *Deferrization of mine waters by generator of cold plasma* [Obeszhelezivanie shakhtnych vod generatorom kholodnoy plasmy]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2011. № 5. P. 50.
2. Barsukov V. I. *Atomnyy spektral'nyy analiz* [Nuclear spectrum analysis]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005. 132 p.
3. Morozov A. I. *Vvedenie v plasmodinamiku* [Introduction into plasma dynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 576 p.
4. Osad'ko I. S. *Selektivnaya spektroskopiya odinochnykh molekul* [Selection spectroscopy of single molecules]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2000. 320 p.
5. Podurayev V. I., Tatarinov D. S., Petrova V. D. Machine processing with cooled ionized air [Mekhanicheskaya obrabotka c okhlazhdeniem ionizirovannym vozdukhom]. *Vestnik mashinostroeniya* [Messenger of mechanical engineering]. 1991. № 11. P. 27–31.
6. Striganov A. N., Sventitskiy N. S. *Tablitsy spektral'nykh liniy neytralnykh ionizirovannykh atomov* [A table of spectral lines of neutral and ionized atoms]. Moscow, Atomizdat Publ., 1966. 900 p.

Поступила в редакцию 20.05.2013

Июнь, № 4 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 630.8

РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ ВОРОНОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
rvoronov@karelia.ru

ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ КОСИЦЫН
кандидат технических наук, заместитель директора ООО «Опти-Софт» (Петрозаводск, Российская Федерация)
kositsyn@psu.karelia.ru

АНТОН ИГОРЕВИЧ ШАБАЕВ
кандидат технических наук, директор ООО «Опти-Софт» (Петрозаводск, Российская Федерация)
ashabaev@petrsu.ru

АННА МИХАЙЛОВНА ВОРОНОВА
преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
voronova_am@petrsu.ru

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА ЩЕГОЛЕВА
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
schegoleva@psu.karelia.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ МНОГОПЕРЕДЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ*

Представлена математическая модель планирования процессов лесозаготовок, транспортных перевозок лесоматериалов и распределения технологических операций между предприятиями в составе лесопромышленного холдинга. Модель охватывает лесозаготовительные предприятия и базы холдинга, лесоперерабатывающие предприятия, а также заказчиков продукции. В качестве целевой функции выбрана сумма складских издержек и затрат на перевозки. Отличительной особенностью модели является учет дискретности цикла производства и запаздывания транспортно-производственных процессов. Модель использована при создании автоматизированной системы оптимального планирования «Лесопереработка», предназначенной для оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины.

Ключевые слова: сквозные процессы лесопереработки, многопередельное производство, оптимальное планирование производства, лесозаготовительные предприятия, лесоперерабатывающие предприятия

Интегрированные структуры в лесопромышленном производстве составляют основу лесопромышленного комплекса России [3], [5], [6]. Как правило, такие структуры охватывают несколько взаимоувязанных производств по заготовке, обработке и переработке лесоматериалов, их предприятия расположены в нескольких регионах. Поэтому эффективное управление такой структурой на уровне согласования технологических цепочек многопередельных производств является одной из востребованных задач. Одним из подходов к ее решению является ее формулировка в виде оптимизационной задачи из класса сетевых транспортных задач.

Ранее были предложены математические модели, охватывающие взаимосвязанные группы производств лесопромышленного комплекса [1], [6], включая класс математических моделей для решения задач планирования и управления материальными потоками, названный классом многоэтапных транспортно-производственных задач. В данной статье предлагается развитие этих моделей путем предположения о дискретности цикла производства и включения в рассмотрение динамических характеристик модели, таких как инерционность и запаздывание транспортно-производственных процессов. Основное внимание уделено важному частному случаю – транспортировке древесины от лесозаготовительных предприятий к лесоперерабатывающим.

Важной задачей лесопромышленного холдинга является выполнение полученных заказов на поставку готовой продукции на разных уровнях передела лесных ресурсов с минимальными затратами. Одним из основных путей снижения затрат является оптимизация транспортных перевозок.

Рассмотрим постановку задачи более подробно. Интегрированная структура включает лесозаготовительные предприятия (ЛЗП), лесозаготовительные базы (ЛЗБ), лесоперерабатывающие предприятия (ЛПП), расположенные в пределах одного лесопромышленного региона. Как правило, в регионе присутствуют ЛЗП и ЛПП, не относящиеся к этой интегрированной структуре. Для каждого ЛЗП установлены предельные нормы лесозаготовки каждого вида древесного сырья по каждой технологии.

ЛПП для производства продукции используют определенные виды древесного сырья, которым их обеспечивают ЛЗП. Предполагается, что на вход технологической операции может поступить только один вид сырья. В качестве производимой продукции может выступать как конечный потребительский товар, так и необработанные лесоматериалы – сырье для деревообрабатывающей и других отраслей промышленности, в том числе за пределами региона. Перерабатывающие предприятия интегрированной структуры в соответствии с имеющимися технологическими возможностями и ограничениями, а также ориентируясь на спрос и цены выпускаемой продукции, осуществляют закупку древесного сырья, заготовленного в ЛЗП. Некоторые ЛЗП могут выполнять переработку своей древесины.

При организации заготовок и поставок сырья из каждого ЛЗП на перерабатывающие предприятия решается вопрос выбора оптимального объема заготовок по каждому виду технологии, а такж е выбора оптимальной структуры поставок с учетом возможных способов и расстояний транспортировки, портфеля заказов на продукцию перерабатывающих предприятий.

Перейдем к постановке математической модели задачи. Введем в рассмотрение индексные множества: M – множество хозяйствующих субъектов, включая лесозаготовительные предприятия, лесозаготовительные базы, лесоперерабатывающие предприятия и заказчиков продукции; M_1 – множество ЛЗП, $M_1 \subset M$; M_2 – множество предприятий (ЛЗП, ЛЗБ, ЛПП), $M_1 \subset M_2 \subset M$; M_3 – множество заказчиков, $M_3 \subset M$; K – множество видов продукции (включая древесное сырье разного вида и с различной породно-возрастной структурой, промежуточную и конечную продукцию); K_0 – множество видов лесосырья, $K_0 \subset K$; Q – множество типов транспортных средств (ТС), число ТС каждого типа считается неограниченным; N – множество технологических операций ЛПП.

Пусть весь период планирования разделен на T дискретных интервалов времени $t = 1, \ldots, T$. Для каждого ЛЗП $i \in M_1$ заданы: V_{it} – технологически максимально возможный объем заготовки лесосырья в интервал времени $t = 1, \ldots, T$; D_{ik} – запас лесосырья вида $k \in K_0$; L_{ik} – множество интервалов времени, когда имеется возможность заготовки лесосырья вида $k \in K_0$.

Для каждого предприятия $i \in M_2$ заданы: K_i – множество видов продукции, производство которых возможно на предприятии; N_i – множество поддерживаемых технологических операций; W_{ij} – максимально возможный объем сырья для выполнения технологической операции $j \in N_i$ в один интервал времени планирования (на практике пропорционально времени применения операции); b_{ik} – максимально возможный объем продукции $k \in K$, хранящейся на складе; c_{ik} – затраты на хранение единицы объема продукции $k \in K$ на складе.

Для каждого заказчика $i \in M_3$ заданы: $k(i) \in K$ – вид продукции (предполагается, что заказывается один вид продукции); U_i – объем заказа; θ_i – крайний срок выполнения заказа.

На вход каждой технологической операции поступает сырье одного заданного вида, на выходе – продукция нескольких видов в заданных пропорциях. Для каждого вида продукции $k \in K$ задано: N_k – множество технологических операций, входным сырьем которых служит продукция k. Для каждой технологической операции $j \in N$ заданы:

- коэффициент выхода $\alpha_{jk_1k_2}$ продукции вида $k_2 \in K$ при использовании сырья $k_1 \in K$ (в границах от 0 до 1);
- время $\tau(j)$ выполнения операции.

Если операция j начинается в интервал времени t, то заканчивается в интервал времени $t + \tau(j)$. Время $\tau(j)$ выполнения операции j может быть равно нулю. Это означает, что полученная продукция в тот же интервал времени может быть подана на вход какой-нибудь другой операции.

Обозначим K_q – множество видов продукции, перевозимых при помощи ТС вида $q \in Q$. Семейство подмножеств K_q образует разбиение множества K. Дополнительные обозначения: c_{ijq} – затраты на поставку единицы продукции транспортным средством вида $q \in Q$ с предприятия $i \in M_2$ на предприятие или заказчику $j \in M$; τ_{ijk} – время на поставку единицы продукции $k \in K_1$ с предприятия $i \in M_2$ на предприятие или заказчику $j \in M$; d_{iqt} – ограничение на объем поставки продукции транспортным средством вида $q \in Q$ с предприятия $i \in M_2$ в интервал времени t.

Неизвестные задачи: x_{ikt} – объем заготовки лесосырья вида $k \in K_0$ в интервал времени t на ЛЗП $i \in M_1$; $\hat{y}_{ijkt}$ – объем продукции вида $k \in K_i$, производимой на предприятии $i \in M_2$ в интервал времени t при выполнении технологической операции $j \in N_i$; $\tilde{y}_{ijkt}$ – объем продукции вида $k \in K_i$, служащей сырьем для выполнения технологической операции $j \in N_i$ на предприятии $i \in M_2$ в интервал времени t; z_{ikt} – объем лесосырья или продукции вида $k \in K$ в интервал времени t, хранящегося на складе предприятия $i \in M_2$; u_{ijkt} – объем отправки продукции $k \in K_i$ с предприятия

$i \in M_2$ на предприятие или заказчику $j \in M_3$ в интервал времени t.

Введем следующие ограничения.

Технологическое ограничение на объем заготовки лесосырья в каждый момент времени:

$$\sum_{k \in K_0} x_{ikt} \le V_{it},\ i \in M_1,\ t \in L_{ik}.$$

На каждом ЛЗП объем заготовки каждого вида лесосырья не может превышать имеющийся запас:

$$\sum_{t \in L_{ik}} x_{ikt} \le D_{ik},\ i \in M_1,\ k \in K_0.$$

Технологическое ограничение на объем переработки по каждой операции на предприятиях:

$$\sum_{k \in K_i} \tilde{y}_{ijkt} \le W_{ij},\ i \in M_2, j \in N_i,\ t = 1, \ldots, T.$$

На каждом предприятии в любой интервал времени объем хранящегося на складе лесосырья или продукции ограничен сверху:

$$z_{ikt} \le b_{ik},\ i \in M_2,\ k \in K,\ t = 1, \ldots, T.$$

Уравнение баланса между расходами сырья и выходом продукции:

$$\hat{y}_{ijk_2 t+\tau(j)} = \alpha_{jk_1k_2} \tilde{y}_{ijk_1t},\ i \in M_2, j \in N_i,\ k_1,$$
$$k_2 \in K,\ t = 1, \ldots, T.$$

Условия баланса для склада ЛЗП:

$$z_{ikt} = z_{ikt}\text{-}1 + x_{ikt} - \sum_{j \in N_i} \tilde{y}_{ijkt} - \sum_{i' \in M} u_{ii`kt},$$
$$i \in M_1,\ k \in K_0,\ t \in L_{ik}.$$

Условия баланса для склада предприятий (кроме ЛЗП):

$$z_{ikt} = z_{ikt\text{-}1} + \sum_{j \in N_i} \hat{y}_{ijkt} - \sum_{j \in N_i} \tilde{y}_{ijkt} + \sum_{i' \in M_2} u_{i'ikt-\tau_{i'ik}} - \sum_{i' \in M} u_{ii`kt},$$
$$i \in M_2 \setminus M_1,\ k \in K \setminus K_0,\ t = 1, \ldots, T.$$

Начальные условия для склада всех предприятий:

$$z_{ik0} = 0,\ i \in M_2,\ k \in K.$$

Ограничение на объемы поставки продукции в разные интервалы времени:

$$\sum_{k \in K_q} \sum_{i' \in M} u_{ii'kt} \le d_{iqt},\ i \in M_2,\ q \in Q,\ t = 1, \ldots, T.$$

Все заказы должны быть выполнены в срок и в полном объеме:

$$\sum_{t=1}^{\theta_i} \sum_{i' \in M_2} u_{i'i\kappa(i)t-\tau_{i'ik}} = U_i,\ i \in M_3.$$

Условия неотрицательности:

$$x_{ikt} \ge 0,\ i \in M_1,\ k \in K_0,\ t = 1, \ldots, T,$$

$$\hat{y}_{ijkt} \ge 0,\ i \in M_2, j \in N_i,\ k \in K_i,\ t = 1, \ldots, T,$$

$$\tilde{y}_{ijkt} \ge 0,\ i \in M_2, j \in N_i,\ k \in K,\ t = 1, \ldots, T,$$

$$z_{ikt} \ge 0,\ i \in M_2,\ \mathrm{k} \in \mathrm{K},\ \mathrm{t} = 1, \ldots, \mathrm{T},$$

$$u_{ii'kt} \ge 0,\ i \in M_2,\ i` \in M,\ k \in K_i,\ t = 1, \ldots, T.$$

Целевая функция – сумма складских издержек и затрат на перевозки:

$$\sum_{i \in M_2} \sum_{k \in K_i} c_{ik} \sum_{t=1}^{T} z_{ikt} + \sum_{i \in M_2} \sum_{i' \in M} \sum_{q \in Q} c_{ii'q} \sum_{k \in K_q} \sum_{t=1}^{T} u_{ii'kt} \to \min.$$

Для экспериментальных исследований в качестве лесопромышленного региона была выбрана Республика Карелия, а в качестве интегрированной структуры – группа компаний ЗАО «Соломенский лесозавод» (http://solomenskiy.ru/), включающая два ЛЗП и одно ЛПП. Число отечественных и зарубежных потребителей продукции – более 100. Перевалочные базы сырья отсутствуют.

На ЛЗП применяются 2 технологии заготовки и производится 210 видов лесопродукции (ель и сосна, по каждой породе – 15 сортировочных групп и 7 видов длин). ЛПП производит около 1400 видов продукции (3–8 сортов по каждому из более 250 видов сечений пиломатериалов).

Производственные операции содержат 5 основных переделов (лесопиление, пакетоформирование, сушка, торцовка, строжка). Все перевозки осуществляются двумя типами транспортных средств, имеющихся в достаточном количестве. Горизонт оперативного планирования составляет один месяц, долгосрочного – один год.

При этих условиях задача имеет 10^6 переменных и 10^3 ограничений. Для ее решения были использованы практики нахождения решения таких задач [2] и использован специализированный модуль UPS.Solver («универсальный решатель») [4], предназначенный для решения сложных оптимизационных задач планирования производством с большим количеством ограничений. В основу модуля положены методы решения задач линейной оптимизации для оптимизационных задач специальной структуры с использованием метода декомпозиции задач линейного программирования Данцига – Вулфа. Матрица ограничений задачи строится с помощью специализированного механизма «Матричный конструктор», позволяющего по данным ограничениям задачи конструировать матрицы специальной блочной структуры.

Полученный оптимальный план включает около 800 значений переменных, определяющих объемы перевозок промежуточной и конечной продукции различного вида.

На практике определение значений параметров объемов и периодов времени возможной заготовки лесосырья представляет собой дополнительную задачу ввиду существенного влияния случайных факторов (надежность заготовительного оборудования, персонала, транспорта и др.), которая, как правило, решается путем использования ряда допущений на основе статистики прошлых периодов и опыта технологов.

Представленная математическая модель была использована при создании автоматизированной системы оптимального планирования (АСОП) «Лесопереработка» для оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины. АСОП «Лесопереработка» может быть использована при планировании производства действующих лесопромышленных предприятий, технологии производства и потребления которых заданы. Также возможно ее использование в планировании новых или реконструкции имеющихся предприятий для моделирования вариантов структуры заготовки сырья, размещения предприятий и распределения видов технологических операций между ними. При этом, возможно, потребуется изменение целевой функции для учета вложенных инвестиций, дисконтированных затрат и прогнозируемых цен на сырье и продукцию.

* Работа выполняется при финансовой поддержке госконтракта № 14.514.11.4004 Министерства образования и науки Российской Федерации, а также Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А. В., Кузнецов В. А., Шегельман И. Р., Щеголева Л. В. Теория и практика принятия оптимальных решений для предприятий лесопромышленного комплекса. Петрозаводск: Изд. ПетрГУ, 2008. 219 с.
2. Воронин А. В., Шабаев А. И., Печников А. А. Конвейерная технология разработки программного обеспечения для управления производственными ресурсами и процессами // Перспективы науки. 2010. Т. 4. С. 95–99.
3. Воронин А. В., Шегельман И. Р. Лесопромышленная интеграция: теория и практика. Петрозаводск: Изд. ПетрГУ, 2009. 464 с.
4. Кузнецов В. А., Воронин А. В., Шабаев А. И., Косицын Д. П. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в ФИПС № 2010617003 «Комплекс алгоритмов и программных модулей для решения прикладных задач оптимизации производственных процессов, использующих операции раскроя, комплектовки и транспортировки материалов». Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 19.10.2010.
5. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Методика принятия решений по оптимизации лесозаготовительных планов // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 69 (05). С. 174–188.
6. Щеголева Л. В. Процесс лесопромышленного производства с использованием вторичных ресурсов биомассы дерева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2007. № 1. С. 152–156.

Voronov R. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kositsyn D. P., L. L. C "Opti-Soft" (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shabaev A. I., L. L. C "Opti-Soft" (Petrozavodsk, Russian Federation)
Voronova A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shchegoleva L. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODEL FOR MULTISTAGE PRODUCTION PLANNING IN FOREST INDUSTRY COMPLEX

The article presents mathematical model of the timber logging process planning and transportation, as well as distribution of technological operations among enterprises within one forest industry holding. The model incorporates logging enterprises and bases of the holding, its processing enterprises and product customers. The target function of the model is to assess warehouse storage and transportation expenses. A distinctive feature of the model is its ability to account for discrete nature of production processes, for time delays in transportation and production processes. The model is used to develop the software system "Wood processing" for optimal planning of end-to-end wood utilization processes. The model can be used for planning new enterprises and renovation of existing ones by modeling various options of the wood logging structure; allocation of enterprises and distribution of technological operations among them.

Key words: end-to-end wood utilization processes, multi-stage, optimal production planning, logging enterprises, wood processing enterprises

REFERENCES

1. Voronin A. V., Kuznetsov V. A., Shegel'man I. R., Shchegoleva L. V. The Theory and Practice of Optimal Solutions for the Forest Industry Enterprises [Teoriya i praktika prinyatiya optimal'nykh resheniy dlya predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2008. 219 p.
2. Voronin A. V., Shabaev A. I., Pechnikov A. A. Conveyor Software Development Technology for Managing Manufacturing Resources and Processes [Konveyernaya tekhnologiya razrabotki programmnogo obespecheniya dlya upravleniya proizvodstvennymi resursami i protsessami]. Perspektivy nauki. 2010. Vol. 4. P. 95–99.
3. Voronin A. V., Shegel'man I. R. Forestry Industry Integration: Theory and Practice [Lesopromyshlennaya integratsiya: teoriya i praktika]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2009. 464 p.
4. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P. Geographic Information System Solutions for Optimization Problem of Transport Logistics for Round Timber [Geoinformatsionnaya sistema dlya resheniya optimizatsionnoy zadachi transportnoy logistiki kruglykh lesomaterialov]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy "Lesnoy zhurnal". 2009. № 3. P. 78–85.
5. Sokolov A. P., Gerasimov Yu. Yu. Technique of Decision-making to Optimize Harvesting Plans [Metodika prinyatiya resheniy po optimizatsii lesozagotovitel'nykh planov]. Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2011. № 69 (05). S. 174–188.
6. Shchegoleva L. V. The Process of Timber Production with the Use of Secondary Resources of Tree Biomass [Protsess lesopromyshlennogo proizvodstva s ispol'zovaniem vtorichnykh resursov biomassy dereva]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy "Lesnoy zhurnal". 2007. № 1. P. 152–156.

Поступила в редакцию 22.04.2013

Июнь, № 4 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 51-76

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ КИРИЛЛОВ
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, профессор кафедры математического анализа математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kirillov@krc.karelia.ru

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ СМИРНОВ
аспирант, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
smirnov_work@mail.ru

ТАТЬЯНА ВИКТОРОВНА РЕЙСС
гидробиолог испытательной лаборатории контроля качества воды, ОАО «ПКС» «Водоканал» (Петрозаводск, Российская Федерация)
smirnov_work@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НИТРИФИКАЦИИ И ОКИСЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПРОТОЧНОЙ БИОСИСТЕМЕ*

Целью данной работы является разработка математической модели биохимических процессов в проточных биосистемах для решения задач прогнозирования и управления. К проточным биосистемам, в частности, относятся аэротенки, в которых происходит очистка сточных вод с помощью активного ила. На основе предлагаемой модели предполагается разработка методов стабилизации процесса биоочистки. На основе компартментального подхода предложена математическая модель взаимосвязанных процессов нитрификации и окисления органических веществ. Динамика двух агрегированных видов субстратов и соответствующих видов микроорганизмов описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. В правые части уравнений введены пороговые функции, позволяющие учесть преимущественное протекание процессов нитрификации или окисления в соответствующих зонах аэротенка. При этом аэротенк идеального перемешивания разбивается на компартменты, каждому из которых соответствует свой вектор текущих и начальных состояний. Вследствие недостатка экспериментальных данных, что характерно для изучаемых процессов, параметрическая идентификация математических моделей промышленных проточных биосистем является трудноразрешимой проблемой. Для ее частичного решения в статье используется метод сканирования и указывается путь дальнейшего уточнения полученных значений параметров.

Ключевые слова: проточная биосистема, аэротенк, нитрификация, окисление, дифференциальные уравнения, параметрическая идентификация

ВВЕДЕНИЕ

Проточные биосистемы, к которым можно отнести и систему биологической очистки сточных вод активным илом, представляют значительный интерес как для биологов, экологов, так и для специалистов в области математического моделирования. Для последних это связано с постановкой новых математических задач и разработкой методов исследования динамики соответствующих процессов.

Для описания такого рода процессов обычно используют системы нелинейных дифференциальных уравнений. Из-за сложности моделей, недостатка экспериментальных данных параметрическая идентификация таких систем является трудноразрешимой задачей. В данной статье предложена модель процесса биоочистки и подход к решению задачи параметрической идентификации.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА

На большинстве очистных сооружений сточная вода, пройдя предварительные этапы обработки, попадает в специальные резервуары, аэротенки, где происходит биологическая очистка. В работе рассмотрен процесс, происходящий в аэротенке-смесителе, в который активный ил и сточная вода поступают непрерывно. Иловая смесь движется вдоль оси аэротенка. Сточная вода, содержащая разные виды субстрата, поступает с одинаковой объемной скоростью равными порциями в нескольких точках аэротенка.

На рис. 1 приведена схема аэротенка очистных сооружений г. Петрозаводска. Выделим два вида субстрата, которые окисляются на очистных сооружениях:

- органический субстрат, характеризуемый концентрацией S_S;
- азот в аммонийной форме, характеризуемый концентрацией S_{NH}.

Очистные сооружения, как правило, успешно справляются с окислением органического субстрата, достаточная же степень окисления аммония может не достигаться. Возникает проблема математического моделирования процесса нитрификации с целью уменьшения величины S_{NH} в очищенной воде.

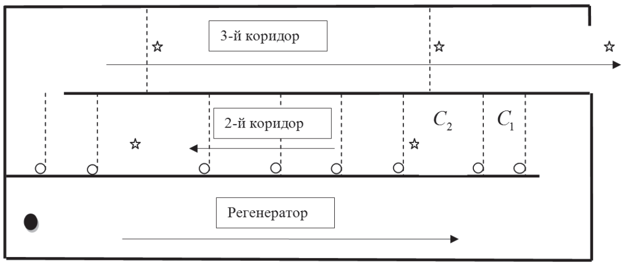


Рис. 1. Схема аэротенка:
○ – место вхождения сточной воды в аэротенк;
● – место вхождения иловой смеси в аэротенк;
☆ – место отбора проб;
→ – направление движения иловой смеси;
--- – границы компартментов

В аэротенке выделим участок длиной l_{el} (например, l_{el} = 1 м) и объем $V_{el} = a \cdot b \cdot l_{el}$, где a – ширина коридора аэротенка, b – высоты иловой смеси в аэротенке. Пусть за время Δt в систему попадают объемы ΔV_{cv}, ΔV_{il} сточной воды и активного ила соответственно. Тогда $v_1 = \frac{\Delta V_{cv}}{\Delta t}$ и $v_2 = \frac{\Delta V_{il}}{\Delta t}$ – объемные скорости вхождения в аэротенк сточной воды и активного ила соответственно. $t_{el} = \frac{V_{el}}{v_1 + v_2}$ – время продвижения иловой смеси на расстояние l_{el}. Учитывая, что сточная вода подается через n труб, рассчитаем объем, который входит через одну трубу за время t_{el}: $V_{cv} = \frac{v_1 \cdot t_{el}}{n}$.

Иловая смесь, двигаясь по коридору аэротенка, попадет к месту вхождения сточной воды (через очередную трубу), где происходит их перемешивание. Таким образом, места вхождения сточной воды естественным образом делят аэротенк на компартменты (C_i, $i = 1, 2, \ldots$), объемы которых равны $V_i = k_i \cdot V_{el}$, где k_i – количество участков длиной l_{el}, входящих в C_i Будем предполагать, что в каждом компартменте происходит идеальное перемешивание иловой смеси, которой на прохождение каждого компартмента требуется время $t_i = k_i \cdot t_{el}$. За время t_i в C_i вливается сточная вода объемом $V_{cv,\, i} = k_i \cdot V_{cv}$.

Пусть S_S^*, S_{NH}^* и $S_{S,i}$, $S_{NH,i}$ – концентрации субстратов в сточной воде и иловой смеси на выходе из i-го компартмента соответственно, $X_{H,i}$, $X_{A,i}$ – концентрации гетеротрофных и автотрофных микроорганизмов иловой смеси на выходе из i-го компартмента соответственно.

При попадании иловой смеси в следующий компартмент, где она перемешивается со сточной водой, концентрации субстратов и микроорганизмов активного ила на входе в $i+1$-й компартмент рассчитываются по формулам:

$$S_{S,i+1}^{in} = \frac{S_S^* \cdot V_{cv,i} + S_{S,i} \cdot V_i}{V_{cv,i} + V_i},\quad S_{NH,i+1}^{in} = \frac{S_{NH}^* \cdot V_{cv,i} + S_{NH,i} \cdot V_i}{V_{cv,i} + V_i}, \quad (1)$$

$$X_{H,i+1}^{in} = \frac{X_{H,i} \cdot V_i}{V_{cv,i} + V_i},\quad X_{A,i+1}^{in} = \frac{X_{A,i} \cdot V_i}{V_{cv,i} + V_i}.$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Группой исследователей во главе с M. Henze был предложен ряд моделей для описания процесса биоочистки [7]. Их подход носит методологический характер и указывает направления для получения конкретных моделей. На основании подхода, предложенного этой группой, разработана модель, учитывающая динамику концентраций органического субстрата, азота в аммонийной форме и микроорганизмов, окисляющих эти субстраты.

В активном иле выделим 2 группы микроорганизмов: гетеротрофные и автотрофные. В общей биомассе гетеротрофов значительно больше, чем автотрофов [8]. Гетеротрофные микроорганизмы преимущественно окисляют органический субстрат, обеспечивая за счет этого рост своей биомассы. Концентрацию органического субстрата будем характеризовать показателем $\text{БПК}_{\text{полн}}$ (полное биохимическое потребление кислорода для окисления субстрата). Однако последний показатель включает в себя расход кислорода и на процессы окисления других веществ, в том числе тех, которые не будут окислены в аэротенке. Поэтому введем пороговую функцию f_1, позволяющую описать переключение процесса окисления с органики на аммоний азота при достижении концентрацией S_S некоторого значения $c + \delta$. В качестве значения c можно взять $\text{БПК}_{\text{полн}}$ надиловой жидкости на выходе из аэротенка. Константа $\delta > 0$ – достаточно малая величина, которая обеспечит ограничение на уменьшение концентрации S_S до величины чуть большей c, что необходимо для непрерывности предложенной ниже математической модели. Значение $\delta = 10^{-3}$ при проведении компьютерных экспериментов оказалось вполне достаточным. Пусть $f_1 = \dfrac{1}{1+e^{10^6(\frac{c+\delta}{S_S}-1)}}$. Поведение функции f_1 имеет ступенчатый характер. При этом $f_1 \approx 0$ при $S_S \in (0, c+\delta-\varepsilon)$, $f_1 \approx 1$ при $S_S \in (c+\delta+\varepsilon, \infty)$, где $\varepsilon > 0$ – достаточно малая величина. Константа 10^6 обеспечивает близость функции f_1 к разрывной ступенчатой функции.

Наличие органических веществ активизирует развитие гетеротрофных микроорганизмов, которые выигрывают у нитрифицирующих микроорганизмов в борьбе за кислород [2]. В результате процесс нитрификации сначала в значительной мере затормаживается и начинает активизироваться по мере удаления органического субстрата. Введем функцию, отражающую этот факт: $f_2 = \dfrac{S_{NH}/(S_S-c)}{K_\alpha + S_{NH}/(S_S-c)}$, где K_α – некоторая постоянная. Заметим, что $f_2 \in (0,\ 1)$, f_2 возрастает при увеличении отношения концентраций $S_{NH}/(S_S-c)$.

Используя зависимость Моно $f(S,K) = \dfrac{S}{S+K}$ и введенные выше функции f_1, f_2, получаем динамическую систему, описывающую процесс биоочистки в компартменте:

$$\dot S_S = Q(S_S^{in}-S_S) - \frac{\mu_H}{Y_H} f(S_S,K_S) f(S_O,K_{O,H}) \frac{1}{1+e^{10^6(\frac{c+\delta}{S_S}-1)}} X_H,$$

$$\dot S_{NH} = Q(S_{NH}^{in}-S_{NH}) -$$

$$- \frac{\mu_A}{Y_A} f(S_{NH},K_{NH}) f(S_O,K_{O,A}) \frac{S_{NH}/(S_S-c)}{K_\alpha + S_{NH}/(S_S-c)} X_A, \quad (2)$$

$$\dot X_H = Q(X_H^{in}-X_H) + \left(\mu_H f(S_S,K_S) f(S_O,K_{O,H}) \frac{1}{1+e^{10^6(\frac{c+\delta}{S_S}-1)}} - b_H \right) X_H,$$

$$\dot X_A = Q(X_A^{in}-X_A) + \left(\mu_A f(S_{NH},K_{NH}) f(S_O,K_{O,A}) \frac{S_{NH}/(S_S-\ )}{K_\alpha + S_{NH}/(S_S-\ )} - b_A \right) X_A,$$

где $Q = \dfrac{1}{T}$ [1] – расход смеси ила и сточной воды, T – время прохождения аэротенка иловой смесью, S_O – конрастворенного кислорода;

Концентрации соответственно на входе и выходе компартмента: S_S^{in}, S_S – растворенных органических веществ; S_{NH}^{in}, S_{NH} – растворенного азота в аммонийной форме; X_H^{in}, X_H – гетеротрофных микроорганизмов; X_A^{in}, X_A – автотрофных микроорганизмов.

Параметры модели: K_S – константа полунасыщения гетеротрофов органическими веществами; K_{NH} – константа полунасыщения автотрофов аммонием азота; $K_{O,H}$ – константа полунасыщения гетеротрофов кислородом; $K_{O,A}$ – константа полунасыщения автотрофов кислородом; Y_H – константа перехода массы органического субстрата в биомассу гетеротрофов; Y_A – константа перехода массы аммония азота в биомассу автотрофов; b_H – скорость распада гетеротрофов; b_A – скорость распада автотрофов; μ_H – максимальная скорость роста гетеротрофов; μ_A – максимальная скорость роста автотрофов.

Для нахождения концентраций на выходе из каждого компартмента производится численное интегрирование системы (2). Результаты интегрирования с использованием параметров из таблицы представлены на рис. 2 и 3. Концентрации на входе в каждый компартмент вычисляются по формулам (1). На рис. 2 показано изменение концентраций в первом компартменте, причем характер изменения сохраняется для всех компартментов, которым на вход подается сточная вода. В остальных компартментах изменение концентраций монотонно. Рис. 3 отражает изменение концентраций во времени при прохождении выделенного объема смеси через аэротенк (по всей длине). «Всплески» соответствуют моментам времени прохождения этим объемом участков входа сточной воды.

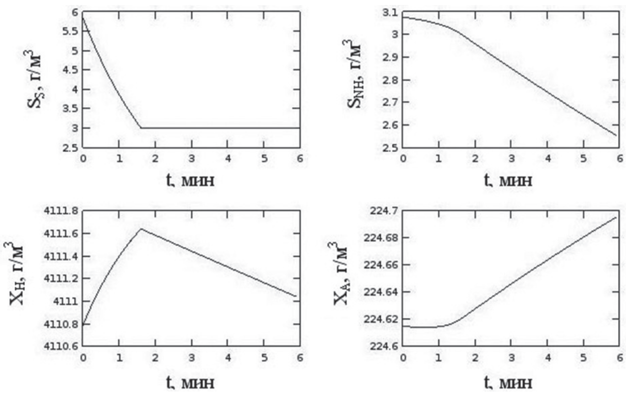


Рис. 2. Динамика концентраций в первом компартменте

Следует отметить, что представленная в данной работе модель позволяет более адекватно описывать процессы окисления органики и нитрификации по сравнению с моделью из [6], что достигается введением соответствующих пороговых функций.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Задача параметрической идентификации математических моделей процесса биоочистки является сложной проблемой в силу следующих причин:

- невозможность учесть в модели все происходящие процессы;
- труднодоступность, а иногда невозможность получения экспериментальных данных;
- «зашумленность» имеющихся данных.

В связи с недостатком экспериментальных данных большинство методов параметрической идентификации неприменимы. Для решения задачи использован метод сканирования [3] в области допустимых значений параметров, определенной с использованием полученных в [8] результатов. Решением является набор параметров $P = (Y_H, Y_A, \mu_H, \mu_A, b_H, b_A, K_S, K_{NH}, K_{O,H}, K_{O,A}, K_\alpha)^T$, который минимизирует целевой функционал $J = \sum_{i=1}^{n_y \cdot N} w_i (y_i - y_i^m)^T (y_i - y_i^m)$, где w_i – весовой коэффициент, n_y – количество наблюдаемых переменных, N – количество точек сбора экспериментальных данных, y_i, y_i^m – экспериментальные и модельные данные соответственно. Численное моделирование проводилось с помощью кластера «Центра высокопроизводительной обработки данных» (ЦКП КарНЦ РАН, 2012–2013). Получение модельных данных проводилось путем решения системы (2) методами прогноза и коррекции и Адамса.

При получении экспериментальных данных общепринятая в практике допустимая погрешность по концентрации аммония составляет $\pm 0{,}5\ \frac{г}{м^3}$, по концентрации микроорганизмов – 14 %.

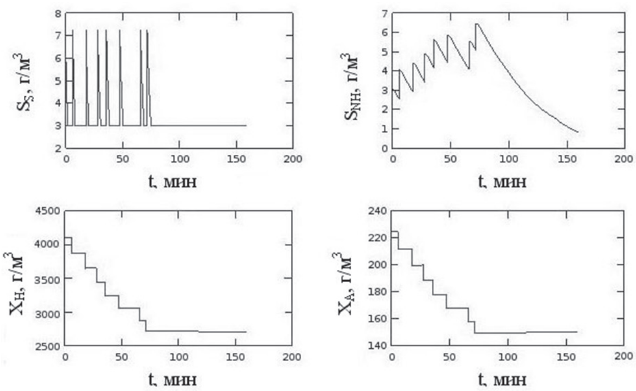


Рис. 3. Динамика концентраций в выделенном объеме иловой смеси в зависимости от времени прохождения им различных участков аэротенка

Проведены компьютерные эксперименты, в которых экспериментальными данными были: БПК$_{полн}$ на выходе из аэротенка; концентрации аммония азота y_1 и общей биомассы микроорганизмов y_2 на входе, в четырех точках аэротенка и на выходе из него. Эти данные были получены на очистных сооружениях г. Петрозаводска в 2012 году. С помощью метода сканирования был получен набор параметров, минимизирующий целевой функционал J.

Значения параметров

Параметр	Значение	Единицы измерения
Y_H	0,38	г биомассы · (г БПК$_{полн}$) $^{-1}$
Y_A	0,24	г биомассы · (г аммония азота) $^{-1}$
μ_H	5,5	сут.$^{-1}$
μ_A	0,58	сут.$^{-1}$
b_H	0,05	сут.$^{-1}$
b_A	0,05	сут.$^{-1}$
K_S	93	г БПК$_{полн}$ · м$^{-3}$
K_{NH}	4,7	г аммония азота · м$^{-3}$
$K_{O,H}$	0,05	г 0_2 · м$^{-3}$
$K_{O,A}$	0,77	г 0_2 · м$^{-3}$
K_α	5	безразмерная величина

ВЫВОДЫ

Предложена математическая модель процесса биоочистки, учитывающая окисление органики, аммония азота и динамику биомассы активного ила. При этом используется компартментальный подход. Специфика моделируемого объекта позволяет редуцировать базовую модель, предложенную в [7], и рассматривать систему, содержащую меньшее количество дифференциальных уравнений. В результате появляется возможность параметрической идентификации модели при небольшом количестве экспериментальных данных. С помощью метода сканирования найден набор параметров, наиболее удовлетворяющий экспериментальным данным.

Возможно дальнейшее уточнение значений параметров с использованием теории чувствительности [4], [5]. Предполагается развитие модели путем введения уравнения динамики концентрации кислорода, что позволит решить задачу управления процессом биоочистки.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилин В. А. Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки. М.: Наука, 1986. 143 с.
2. Жмур Н. С. Управление процессом и контроль результата очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: Луч, 1997. 172 с.
3. Метод сканирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://flowmetrika.narod.ru/_algorithms/algoritm_metod_skanirovania.htm
4. Пупков К. А. и др. Методы классической и современной теории автоматического управления: В 3 т. Т. 1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 748 с.
5. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем автоматического управления. Л.: Энергия, 1969. 208 с.

6. Смирнов Н. В. Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод // Ярославский педагогический вестник. Сер. «Естественные науки». 2012. Т. 3. № 3. С. 44–49.
7. Henze M., Gujer W., Takashi M., Van Loosdrecht M. Activates sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London: IWA Publishing. Scientific and Technical Report series, 2000. 130 p.
8. Boulkroune B., Darouach M., Zasadzinski M., Gille S. A nonlinear observer for an activated sludge wastewater treatment process // USA, American Control Conference. 2009. P. 1027–1033.

Kirillov A. N., Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Smirnov N. V., Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Reyss T. V., JSC «PKS», «Vodokanal» (Petrozavodsk, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODELING OF NITRIFICATION AND ORGANIC MATTER OXIDATION PROCESSES IN FLOW-THROUGH BIOSYSTEM

We developed a mathematical model of biochemical processes occurring in the flow-through biosystems for the purpose of prediction and control of the above-mentioned processes. A wastewater treatment aeration tank is estimated as an example of such a system. We have considered a well-mixed continuous aeration tank divided into compartments. Vectors of current and initial states correspond to each compartment. The nitrification and organic matter oxidation mathematical model is proposed. Dynamics of the two types of aggregated substrates and related types of microorganisms are described by the system of nonlinear ordinary differential equations. The threshold functions are introduced in the right-hand side of the equations. This makes nitrification or oxidation of organic matter in the aeration tank possible. The industrial flow-though biosystem parametrical identification is a complex problem due to insufficient amount of experimental data. A scanning method is used to obtain a numerical solution to this problem. Perspectives of the further model development and ways of more precise parameters' assessment are discussed.

Key words: flow-though biosystem, aeration tank, nitrification, oxidation, differential equations, parametric identification

REFERENCES

1. Vavilin V. A. *Vremya oborota biomassy i destruktsiya organicheskogo veshchestva v sistemakh biologicheskoy ochistki* [Turnover time of biomass and degradation of organic matter in biological treatment systems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 143 p.
2. Zhmur N. S. *Upravlenie protsessom i kontrol' rezul'tata ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami* [Process management and control of cleaning results at wastewater treatment plants equipped with aeration tanks]. Moscow, Luch Publ., 1997. 172 p.
3. *Metod skanirovaniya* [Scanning Method]. Available at: http://flowmetrika.narod.ru/_algorithms/algoritm_metod_skanirovania.htm
4. Pupkov K. A. et al. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 1: Analiz i statisticheskaya dinamika sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern automatic control theory. Vol. 1: Analysis and statistical dynamics of automatic control systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 748 p.
5. Rozenvasser E. N., Yusupov R. M. *Chuvstvitel'nost' sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Sensitivity of Automatic Control Systems]. Leningrad, Energia Publ., 1969. 208 p.
6. Smirnov N. V. Mathematical modeling of biological wastewater treatment [Matematicheskoe modelirovanie protsessa biologicheskoy ochistki stochnykh vod]. *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. "Estestvennye nauki"*. 2012. Vol. 3. P. 44–49.
7. Henze M., Gujer W., Takashi M., Van Loosdrecht M. Activates of sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London, IWA Publishing. Scientific and Technical Report series, 2000. 130 p.
8. Boulkroune B., Darouach M., Zasadzinski M., Gille S. A nonlinear observer for an activated sludge wastewater treatment process // USA, American Control Conference. 2009. P. 1027–1033.

Поступила в редакцию 08.04.2013

Июнь, № 4 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 51-74

АРТЕМ ВИКТОРОВИЧ СКАБИН
аспирант кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
artb00g@gmail.com

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
rogov@psu.karelia.ru

БИНАРИЗАЦИЯ И ВЫДЕЛЕНИЕ СИМВОЛОВ ИСТОРИЧЕСКОЙ СТЕНОГРАММЫ*

Рассматривается проблема бинаризации исторических рукописных документов с целью выделения графики символов. От точности и правильности бинаризации текста зависит правильность результата дешифровки исторического документа. В качестве объекта взяты исторические стенограммы XIX века. Проводится анализ различных методов бинаризации (методы Отсу, Бернсена, Эйквиля, Ниблэка, разнообразные пороговые методы). Проведенное исследование выявило, что предлагаемый модифицированный пороговый метод показал лучший результат на основании F-меры. Данный метод применен в программном комплексе для получения оригинальной графики символов. При помощи разработанного программного комплекса были разобраны 29 листов стенограмм. На них было выделено более 6800 график символов.

Ключевые слова: методы бинаризации, исторические рукописные документы, стенограммы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время из-за невозможности дешифровки исторических документов современными исследователями в архивах России хранится большой объем нерасшифрованных стенографических документов. Основная сложность дешифровки стенограмм заключается в том, что современная стенография существенно отличается от исторических систем стенографии XIX века и нет людей, обладающих знаниями о системах стенографической записи в XIX – начале XX века. Наиболее естественной выглядит автоматизация данного процесса с использованием современных компьютерных технологий. Для автоматизации расшифровки исторических рукописных документов необходимо решить следующие задачи:

- выделение символов (как правило, это бинаризация документа);
- выделение полного набора стенографических символов (задача кластеризации);
- разделение связных стенографических символов;
- база знаний дешифровки символов;
- выделение строк, а также надстрочных и подстрочных символов;
- дешифровка стенограммы.

БИНАРИЗАЦИЯ СТЕНОГРАММЫ

Бинаризация исторических рукописных документов осложнена их плохим состоянием (пожелтевшая бумага, написаны простым карандашом, на бумаге существуют разрывы, грязь, просвечивание с обратной стороны листа и т. д.). Для выбора наиболее эффективного метода бинаризации исторических стенограмм Сниткиной (наброски к «Дневнику писателя» за 1881 год и «Из воспоминаний А. Г. Достоевской») было рассмотрено 7 различных методов бинаризации. На рис. 1a представлен фрагмент одной из рассмотренных стенограмм, на рис. 1b – его эталонная бинаризация.

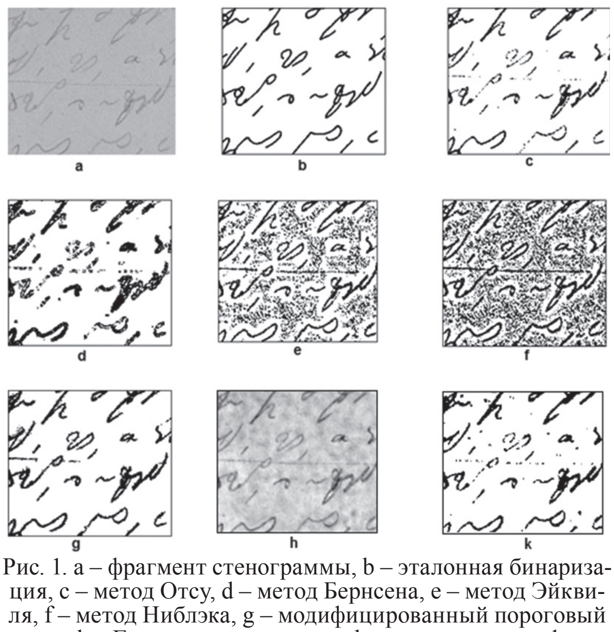


Рис. 1. a – фрагмент стенограммы, b – эталонная бинаризация, c – метод Отсу, d – метод Бернсена, e – метод Эйквиля, f – метод Ниблэка, g – модифицированный пороговый метод, h – Гауссовское размытие, k – результат модифицированного порогового метода на Гауссовском размытии

МЕТОД ОТСУ

Метод Отсу [10] используется для пороговой бинаризации полутоновых изображений. При обработке изображений данным методом подразумевается наличие пикселей двух классов: фоновые и пиксели, относящиеся к текстовой информации изображения. Метод заключается в поиске оптимального порога бинаризации, который разделяет изображение на два вышеописанных класса таким образом, чтобы их внутриклассовая дисперсия была минимальной. Она определяется как взвешенная сумма дисперсий двух классов:

$$\sigma_{\omega}^{2}(t)=\omega_{1}(t)\sigma_{1}^{2}(t)+\omega_{2}(t)\sigma_{2}^{2}(t), \qquad (1)$$

где ω_1, ω_2 – веса, вероятности двух классов, разделенных порогом t, σ_1^2, σ_2^2 – дисперсия этих классов. Результат работы метода Отсу представлен на рис. 1c.

МЕТОД БЕРНСЕНА

Метод Бернсена [7] является локальным пороговым методом бинаризации, при котором пороги рассчитываются исходя из значений уровня яркости пикселей из квадратной окрестности пикселя $p_{i,j}$. Данный алгоритм заключается в следующем: для каждого пикселя $p_{i,j}$ находится максимальное Y_{max} и минимальное Y_{min} значение уровня яркости. Яркость пикселя рассчитывается по формуле (2) [3]

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,5876 \cdot G + 0,114 \cdot B, \qquad (2)$$

где R – значение красной компоненты пикселя, G – значение зеленой компоненты пикселя, B – значение синей компоненты пикселя. Далее, если уровень контраста – разность между минимальным и максимальным значениями яркости – больше некого порога, тогда данный пиксель относят к классу пикселей символов, иначе – к классу фона. Недостатком данного метода является то, что при обработке монотонных (по яркости) областей появляется большое количество помех и шумов. Результат работы метода Бернсена представлен на рис. 1d.

МЕТОД ЭЙКВИЛЯ

Метод Эйквиля [8] является одним из самых производительных методов бинаризации. Он часто применяется для обработки четких и контрастных изображений. В данном методе используются два скользящих, обычно квадратных окна: малого S и большого W. Данные окна накладываются с шагом, равным ширине малого окна.

Для всех пикселей большего окна вычисляется оптимальный порог по методу Отсу, если разница математического ожидания уровней яркости в двух кластерах больше некоторого порога, заданного пользователем $|\mu_0 - \mu_1| \geq \varepsilon$. Тогда пиксели малого окна бинаризуются в зависимости от найденного порога. Если же $|\mu_0 - \mu_1| < \varepsilon$, тогда все пиксели малого окна относятся к классу с ближайшим средним значением. Результат работы метода Эйквиля представлен на рис. 1e.

МЕТОД НИБЛЭКА

Метод Ниблэка [9] является быстрым локальным адаптивным методом бинаризации. Зачастую данный метод используется без бинаризации контрастных изображений с плавными переходами яркости и малым количеством шума.

Пороговое значение для бинаризации пикселя $p_{i,j}$ находится по следующей формуле:

$$t(i,j)=\mu(i,j)-k\sigma(i,j),$$

где $\mu(i,j)$ – среднее, $\sigma(i,j)$ – среднеквадратичное отклонение в окрестности пикселя $p_{i,j}$.

Размер окрестности для расчета порога бинаризации пикселя выбирается достаточно большой, чтобы снизить влияние локального шума, но не настолько, чтобы при обработке терялись локальные детали бинаризуемого изображения. Результат работы метода Ниблэка представлен на рис. 1f.

ПОРОГОВЫЕ МЕТОДЫ БИНАРИЗАЦИИ

Существует большое множество различных пороговых методов бинаризации изображений: бинаризация с нижним порогом, с верхним порогом, с двойным ограничением и т. д. Сложность использования данных методов заключается в правильном расчете порога бинаризации. Эти методы являются высокопроизводительными, но дающими большое количество шума и неточностей. Суть данных методов заключается в том, чтобы выбрать некий порог, такой, что:

$$p'_{i,j}=\begin{cases}0, & p_{i,j}\geq t\\ 1, & p_{i,j}<t\end{cases}.$$

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПОРОГОВЫЙ МЕТОД

Из-за состаренности изображения и того, что стенографические записи сделаны простым карандашом на пожелтевшей бумаге, пороговый метод по цветовым компонентам (RGB) оказался неприемлемым для данной задачи, так как пиксели фона и символов имеют схожие значения цветовых компонент. Как видно на гистограммах (рис. 2), отсутствие двух явно выраженных пиков не позволяет выбрать пороговое значение для бинаризации. Такие же результаты получаются (рис. 2), если использовать разложение по цветовой схеме HSB (оттенок, насыщенность, яркость). Производя бинаризацию только по пороговому значению яркости, удалось получить четкие символы с малым количеством шума [4].

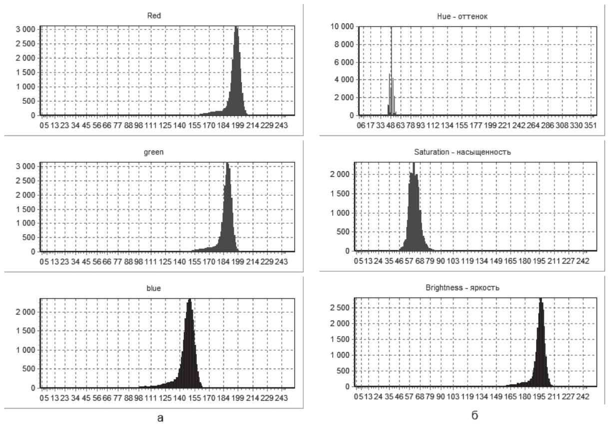


Рис. 2. Гистограммы цветовых схем RGB (а) и HSB (б)

Аналогичные результаты получены в [1] при распознавании банковских чеков.

Экспериментально было найдено пороговое значение яркости, при котором символы получаются наиболее четкими, с наименьшим количеством шума. Наилучший результат достигается, если доля черных пикселей после бинаризации приближается к 13 % от общего числа пикселей. Результат работы модифицированного порогового метода представлен на рис. 1g.

Для улучшения результатов бинаризации используют различные методы предобработки изображения: эвристический метод порогового отсечения без параметров, методы пространственной фильтрации, применяющие лапласиан, методы выделения границ, методы сглаживания [5]. В данной статье рассматривается размытие Гаусса, примененное к исходному фрагменту (рис. 1h). Результат работы модифицированного порогового метода на предобработанном изображении показан на рисунке 1k.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ МЕТОДОВ

Оценка результатов работы различных методов бинаризации исторических рукописных документов была проведена на основе критериев полноты, точности и F-меры [2]. Точность считалась как количество правильно определенных черных пикселей относительно эталона к общему числу черных пикселей в эталоне. Полнота равна количеству правильно определенных черных пикселей относительно эталона к общему числу черных пикселей эталонного бинаризованного рукописного документа. Результаты оценки работы методов представлены в таблице.

Результаты сравнения методов бинаризации

Метод	Точность бинаризации	Полнота бинаризации	F-мера
Метод Отсу	0,8637	0,6684	0,753602
Метод Бернсена	0,7362	0,7841	0,759395
Метод Эйквиля	0,5111	0,7228	0,598789
Метод Ниблэка	0,4398	0,7703	0,559917
Пороговый модифицированный метод	0,8165	0,7717	0,793468
Пороговый модифицированный метод + Гауссовское размытие	0,8284	0,7433	0,783612

Исходя из полученных значений F-меры пороговый модифицированный метод демонстрирует наилучшие показатели при бинаризации рукописных исторических документов.

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА БИНАРИЗАЦИИ И ВЫДЕЛЕНИЯ СИМВОЛОВ

Для распознавания исторических стенографических рукописных документов необходимо иметь весь набор символов, который использовал стенографист для записи. Для этого была создана автоматизированная система получения и разделения оригинальной графики символов. После запуска системы пользователь видит перед собой рабочую область (рис. 3), которая разделена на две части. Пользователь при помощи пункта меню «Файл» → «Загрузить» загружает оригинальную стенограмму для разбора. После загрузки она отображается в левой рабочей области, а в правой отображаются уже разобранные ранее символы. После этого пользователь в левой части выделяет прямоугольную область, содержащую разбираемый символ, оригинальную графику которого он хочет получить. Выделение дублируется в правой рабочей области. С помощью пунктов меню «Распознание» → «Распознать символ» или же горячей клавишей начинается распознание символа. Компьютерная программа с помощью модифицированного порогового метода бинаризует выделенный фрагмент стенограммы, удаляет шумы и производит определение связанных фрагментов.

Пользователю предъявляется найденный символ (рис. 4). В случае, если символ разбивается на отдельные фрагменты, то пользователю предъявляются все фрагменты, а он выбирает те, которые, по его мнению, относятся к текущему символу, при этом система производит связывание разорванных фрагментов. Если же, по мнению пользователя, символ неполностью схож с первоначальным (произошло слияние, разрыв символа), то предусмотрена возможность его дополнительного редактирования (кнопка «Редактировать выбранные»). Пользователю представляется упрощенный графический редактор для символов.

После бинаризации символа система производит поиск в текущей базе данных похожих символов и предлагает пользователю выбрать из найденных или же добавить новый символ. Степень похожести определяется на основе комбинированного алгоритма. В настоящий момент

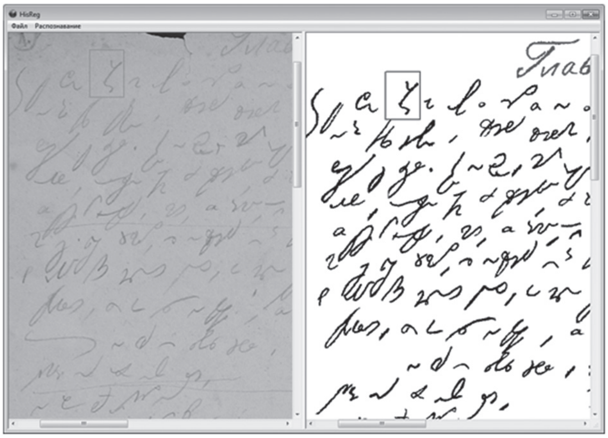


Рис. 3. Рабочая область системы получения оригинальной графики символов

Рис. 4. Результаты обработки различных фрагментов стенограммы

мы работаем над его улучшением. При добавлении символа пользователь может указать зачеркнутые и нестенографические символы. Эта информация отображается в правой области цветом символов. Черный цвет означает стенографические символы, а красный – все остальные, включая зачеркнутые стенографистом символы.

Данная система получения оригинальной графики стенографических символов использовалась при обработке 29 листов стенограмм. На них было выделено более 6800 график символов, которые были разбиты с помощью модифицированного метода «сравнения контуров», описанного в [6], на более чем 400 групп (различные стенографические символы, буквы, цифры, слова). Проверить правильность разбиения можно только в процессе дешифровки, первые результаты которой обнадеживают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе анализа стенограмм было выявлено, что по цветовым компонентам значение пикселей текста и фона находятся в небольшой окрестности некоторого значения, что означает низкую эффективность стандартных пороговых методов. Локальные пороговые методы, такие как Эйквиля и Ниблэка, при бинаризации дают хорошую полноту, но из-за большого количества шума, который не убирается при помощи удаления связанных компонент малой площади, точность их работы уменьшается. Наилучший результат работы показал модифицированный пороговый метод, при удалении шума он дает наибольшее значение F-меры. Повысить качество распознавания может предварительная обработка листов стенограмм [5]. В будущем мы планируем провести соответствующие эксперименты.

С компьютерной системой дешифровки стенограмм должен работать исследователь, поэтому одно из основных условий используемых методов в этой системе – быстродействие. Необходимо создать комфортные условия работы с системой, пользователь не должен длительное время проводить в ожидании выполнения той или иной операции. Это условие накладывает существенные ограничения на используемые алгоритмы.

* Работа поддержана грантом РГНФ № 11-01-12026в (руководитель – А. А. Рогов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горский Н., Анисимов В., Горская Л. Распознавание рукописного текста: от теории к практике. СПб.: Политехника, 1997. 126 с.
2. Маннинг К. Д., Рагхаван П., Шютце Х. Введение в информационный поиск: Пер. с англ. М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2011. 528 с.
3. Порев В. Н. Компьютерная графика. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 432 с.
4. Рогов А. А., Скабин А. В., Штеркель И. А. О дешифровке исторических рукописных документов // Информационные технологии и письменное наследие El'Manuscript 2012: Материалы IV Междунар. науч. конф. Петрозаводск, 3–8 сентября 2012. Петрозаводск, 2012. С. 230–233.
5. Талбонен А. Н., Рогов А. А. Анализ машинописных подписей к фотографиям в цифровом историческом альбоме // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 109–113.
6. Belongie S., Malik J., Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24. № 4. P. 509–522.
7. Bernsen J. Dynamic thresholding of grey-level images // Proc. 8th International Conference on Pattern Recognition (ICPR8). Paris, 1986. P. 1251–1255.
8. Eikvil L., Taxt T., Moen K. A fast adaptive method for binarization of document images // Proc. 1st Int. Conf. Document Analysis and Recognition. Saint-Malo, 1991. P. 435–443.

9. N i b l a c k W. An Introduction to Digital Image Processing. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1986. P. 115–116.
10. O t s u N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. SMC-9. P. 62–66.

Skabin A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rogov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

BINARIZATION AND ISOLATION OF HISTORICAL MANUSCRIPTS' SYMBOLS

The problem of historical manuscripts' binarization with the purpose of original symbol graphics' isolation is considered. Correctness of historical documents' decryption largely depends upon valid and proper binarization of the text.
Historical shorthand records of the XIX century are taken as objects of research. The analysis of various binarization methods (Otsu, Bernsen's methods, Eykvil, Niblek, and various threshold methods) was carried out. The conducted research proved that the proposed modified threshold method based on F-measure is more effective than other methods. The method is applied in the software complex aimed at getting original graphical representation of the symbols. The use of the elaborated software complex was instrumental in the reading of 29 manuscript sheets. More than 6,800 graphic symbols were isolated during decoding process.

Key words: binarization methods, historical handwritten documents, shorthand report

REFERENCES

1. G o r s k i y N., A n i s i m o v V., G o r s k a y a L. *Raspoznavanie rukopisnogo teksta: ot teorii k praktike* [Handwriting recognition: from theory to practice]. St. Petersburg, Politekhnika Publ., 1997. 126 p.
2. M a n n i n g K. D., R a g h a v a n P., S c h y u t t s e H. *Vvedenie v informatsionnyy poisk* [Introduction to Information Retrieval]. Moscow, OOO "I. D. Vil'yams" Publ., 2011. 428 p.
3. P o r e v V. N. *Komp'yuternaya grafika* [Computer graphics]. St. Petersburg, BHV-Peterburg-Publ., 2002. 432 p.
4. R o g o v A. A., S k a b i n A. V., S h t e r k e l ' I. A. About deciphering Historical Manuscripts [O deshifrovke istoricheskikh rukopisnykh dokumentov] *Informatsionnye tekhnologii i pis'mennoe nasledie El'Manuscript 2012* [Informational technologies and written heritage]. Petrozavodsk, 2012. P. 230–233.
5. T a l b o n e n A. N., R o g o v A. A. Analysis of typewritten photo captions in digital historical records [Analiz mashinopisnykh podpisey k fotografiyam v tsifrovom istoricheskom al'bome]. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki" [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 2 (123). P. 109–113.
6. B e l o n g i e S., M a l i k J., P u z i c h a J. Shape matching and object recognition using shape contexts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24. № 4. P. 509–522.
7. B e r n s e n J. Dynamic thresholding of grey-level images // Proc. 8th International Conference on Pattern Recognition (ICPR8). Paris, 1986. P. 1251–1255.
8. E i k v i l L., T a x t T., M o e n K. A fast adaptive method for binarization of document images // Proc. 1st Int. Conf. Document Analysis and Recognition. Saint-Malo, 1991. P. 435–443.
9. N i b l a c k W. An Introduction to Digital Image Processing. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1986. P. 115–116.
10. O t s u N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. SMC-9. P. 62–66.

Поступила в редакцию 15.04.2013

Июнь, № 4 Физико-математические науки 2013

УДК 004.942

ЛЮДМИЛА ВИКТОРОВНА САХАРОВА
кандидат технических наук, доцент кафедры общенаучных дисциплин, Ростовский филиал Морской государственной академии им. адмирала Ф. Ф. Ушакова (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
L_Sakharova@mail.ru

«ВОЛНОВОЕ» АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФОКУСИРОВАНИЯ

Статья посвящена асимптотическому анализу математической модели изоэлектрического фокусирования (ИЭФ) в так называемых «аномальных» режимах. Математическим описанием задачи ИЭФ водного раствора амфолитов является интегро-дифференциальная задача, состоящая из N дифференциальных уравнений, одного алгебраического уравнения и N интегральных уравнений. Графики аналитических концентраций амфолитов (так называемые профили амфолитов), являющиеся решениями задачи, в обычных режимах имеют вид стандартных гауссовских кривых. В «аномальных» режимах, при высоких плотностях тока J, имеет место нарушение гауссовского распределения: на вершинах графиков появляются «плато», расширяющиеся при увеличении J. Поскольку гауссовский закон распределения случайных величин является одним из важнейших и наиболее употребительных в математической физике, его нарушение представляет серьезный научный интерес. Не является ли гауссовское распределение частным случаем некоего «гипергауссовского», более общего распределения? Какая формула выражает это распределение? В настоящей работе получено асимптотическое решение задачи ИЭФ, устанавливающее вид негауссовского распределения концентраций в «аномальных» режимах. Применение метода перевала к интегро-дифференциальной задаче позволяет представить ее решение в виде экспоненциальной функции со степенным («волновым») рядом в показателе. Асимптотическими методами математической физики установлено, что для каждого значения плотности тока J имеется конечное число членов ряда, обладающих существенным вкладом в сумму ряда; остальными слагаемыми можно пренебречь в силу их малости. В частности, для равномерного распределения амфолитов решение представляет собой экспоненциальную функцию с конечным числом четных степеней $(x-x_k)^{2l}$ в показателе, причем величины l увеличиваются при возрастании плотности тока J. Известно, что «плато» на вершине графика функции $exp\,(-x^{2k})$ тем шире, чем больше значение l в показателе функции. Проведенный анализ объясняет поведение профилей концентраций в «аномальных» режимах и указывает формулу, являющуюся обобщением гауссовского решения для жесткой интегро-дифференциальной задачи ИЭФ.

Ключевые слова: интегро-дифференциальная задача, гауссовская функция, «волновой» ряд

ВВЕДЕНИЕ

Изоэлектрическое фокусирование является одним из наиболее употребительных методов фракционирования и анализа биохимических смесей [8]. При одномерном ИЭФ в естественных градиентах pH в электролитическую камеру (ЭК), представляющую собой цилиндр длиной l и радиусом r, помещается раствор амфолитов (амфотерных аминокислот, обладающих высокой буферной емкостью). Для каждого амфолита известны его коэффициенты миграции μ_k, константы диссоциации $K_1^{(k)}$, $K_2^{(k)}$, а также общие количества m_k, $k = 1, 2, \dots, N$. Температура T внутри ЭК считается постоянной. Под действием электрического тока плотности J в ЭК формируется неоднородная по pH среда. Картина при этом остается неизменной в любом осевом сечении ЭК; вследствие этого все рассматриваемые величины являются функциями одной переменной x, ось которой параллельна оси цилиндра. Разделяемые компоненты при некоторых значениях pH имеют нулевую скорость миграции и фокусируются в соответствующих областях ЭК. Соответствующие точки $x = x_k$ называются изоэлектрическими точками.

Для математического описания системы ИЭФ традиционно используются концентрация ионов водорода $H(x)$ и аналитические концентрации амфолитов $\xi_k(x)$, $k = 1, 2, \dots, N$; данные функции являются решениями одномерной задачи, достаточно сложной для исследования как аналитическими, так и численными методами [1], [2]. Нами было предложено преобразование задачи ИЭФ к более компактному и удобному для исследования виду [3], [5]. Установлено, что указанные функции могут быть найдены из формул:

$$\xi_k(x) = c_k(x)\phi_k(\psi), \quad (1)$$

$$H = k_w\, exp(\psi), \quad (2)$$

$$\phi_k(\psi) = \delta_k + ch(\psi - \psi_k), \quad (3)$$

где $k_w = 10^{-7}$ – константа автодиссоциации воды; c_k, ψ – вспомогательные функции, являющиеся решением интегро-дифференциальной задачи, состоящей из N дифференциальных уравнений, одного алгебраического уравнения и N интегральных уравнений:

$$\varepsilon \frac{dc_k}{dx}\frac{1}{c_k} = \frac{\phi_k'(\psi)}{\phi_k(\psi)}\frac{J}{\sigma}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sum_{k=1}^{n}\mu_k c_k\left(\phi_k''(\psi) - \frac{(\phi_k'(\psi))^2}{\phi_k(\psi)}\right) + 2k_w\mu\, ch(\psi - \psi_0), \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{n} c_k\,\phi_k'(\psi) + 2k_w sh\psi = 0, \quad (6)$$

$$\int_0^l c_k(x)\phi_k(\psi)\,dx = M_k, \qquad M_k = \frac{m_k}{2\pi r^2}, \quad (7)$$

где $\varepsilon = RT/F$ – стандартный электрохимический параметр (величины R, T и F – соответственно универсальная газовая постоянная, температура и число Фарадея); ψ_k, d_k, ψ_0, μ – известные константы, связанные с электрохимическими параметрами посредством формул:

$$\psi_k = \frac{1}{2}ln\left(K_1^{(k)}K_2^{(k)} / k_w^2\right), \quad \delta_k = \frac{1}{2}\sqrt{K_1^{(k)} / K_2^{(k)}},$$
$$\psi_0 = \frac{1}{2}ln\left(\mu_{OH} / \mu_H\right), \quad \mu = \sqrt{\mu_H \mu_{OH}},$$

(значения ψ_k соответствуют изоэлектрическим точкам амфолитов).

Основоположниками математической теории ИЭФ [8] была построена базовая математическая модель, согласно которой распределение концентрации амфолитов определяется стандартной функцией плотности гауссовского распределения. Гауссовские кривые для концентраций амфолитов получены при компьютерном моделировании ИЭФ многими авторами [7], [8], [9], [10], однако ими же в ряде случаев было получено искажение гауссовского распределения, получившее название «аномальных» режимов ИЭФ [7], [9], [10]. В «аномальных» режимах, наблюдаемых, как правило, при высоких плотностях тока, профили концентраций амфолитов утрачивают сходство с плотностью гауссовского распределения. На вершинах профилей при достижении некоторой критической плотности тока появляются «плато», расширяющиеся при увеличении плотности тока. Нами также были зафиксированы «аномальные» режимы при численном решении соответствующей интегро-дифференциальной задачи [3], [4], [5] (рис. 1).

Математический аспект трансформации гауссовского распределения в «платообразное» в «аномальных» режимах остался за рамками работ [7], [9], [10], являющихся прикладными электрохимическими исследованиями. Не является ли гауссовское распределение частным случаем некоего «гипергауссовского», более общего распределения? Какая формула выражает это распределение? Вопрос представляет серьезный научный интерес, поскольку гауссовский закон распределения случайных величин является одним из важнейших и наиболее употребительных в математической физике. На этот вопрос отвечает настоящая работа, в которой асимптотическими методами математической физики (в частности, методом перевала) построена так называемая «волновая» асимптотика решения, являющаяся обобщением гауссовской функции для задачи ИЭФ при высоких плотностях тока.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Для дополнительного преобразования задачи ИЭФ нами была введена в рассмотрение новая функция:

$$a_k = c_k\phi_k(\psi), \quad (8)$$

формально совпадающая с функцией концентрации $\xi_k(x)$. Символ a_k обозначает асимптотическое решение задачи, обладающее условиями непрерывности на отрезке и бесконечной дифференцируемости в окрестности изоэлектрической точки.

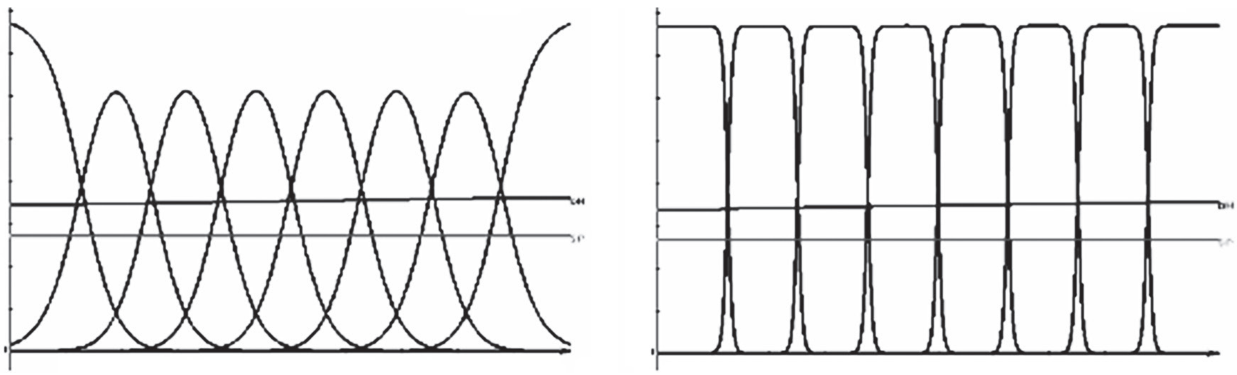


Рис. 1. Трансформации классических гауссовских кривых в «платообразные» в «аномальных» режимах ИЭФ

Путем введения в рассмотрение новой функции

$$\theta_k = \phi_k' / \phi_k = sh(\psi - \psi_k)(\delta_k + ch(\psi - \psi_k))^{-1} \qquad (9)$$

система (4)–(7) может быть приведена к виду:

$$\frac{da_k}{dx}\frac{1}{a_k} = \frac{\lambda J}{\sigma}\theta_k + \frac{d\psi}{dx}\theta_k\,, \qquad (10)$$

$$\sigma = \sum_{k=1}^{n}\mu_k a_k \frac{d\theta_k}{d\psi} + 2k_w \mu\, ch(\psi - \psi_0), \qquad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{n} a_k\theta_k + 2k_w\, sh\psi = 0\,, \qquad (12)$$

$$\frac{d\psi}{dx} = -\frac{\lambda J}{\sigma}\left(\sum_{k=1}^{n} a_k\theta_k^2\right)\left(\sum_{k=1}^{n} a_k\left(\theta_k^2 + \frac{d\theta_k}{d\psi}\right) + 2k_w\, ch\psi\right)^{-1}. \qquad (13)$$

Действительно, подстановка функции a_k из (8) в уравнение (4) с учетом (9) сводит уравнение (8) к виду (10). Подстановка функций a_k и θ_k в уравнение (6) трансформирует его в уравнение (12). Наконец, дифференцирование уравнения (6) с последующей подстановкой в него da_k/dx из (10) позволяет получить уравнение (13).

Непосредственное интегрирование уравнения (10) позволяет установить, что его решение может быть представлено в форме:

$$a_k(x) = a_k(0)\frac{\phi_k(\psi)}{\phi_k(\psi(0))}\exp\left(\lambda J\int_0^x \frac{\theta_k}{\sigma}dx\right). \qquad (14)$$

При подстановке формулы (14) в интегральное условие (7) с учетом формулы (8) получим интегральное уравнение:

$$\frac{a_k(0)}{\phi_k(\psi(0))}\int_0^l \phi_k(x)\exp\left(\lambda J\int_0^x \frac{\theta_k}{\sigma}dx\right)dx = m_k\,. \qquad (15)$$

Поскольку $\lambda = F/RT \approx 38{,}915$, то при больших значениях плотности тока J к уравнению (15) применим классический метод перевала. В соответствии с методом перевала [6], если для интеграла

$$F(\lambda) = \int_a^b f(x) exp\left(\lambda S(x)\right)dx$$

выполнены условия: λ есть большой параметр; $I = [a, b]$ – конечный отрезок; $f(x)$, $S(x) \in C(I)$; $max\ S(x)$ достигается только в одной точке x_0; $f(x)$, $S(x) \in C^\infty$ в окрестности точки x_0; $S^{(j)}(x_0) = 0, 1 \le j \le 2m-1$ и $S^{(2m)}(x_0) \ne 0, m \ge 1$, то при $\lambda \to \infty$ главный член асимптотики имеет вид:

$$F ùùùùù \lambda\, m^{-1}\Gamma \quad m \left(- \quad m \quad S^{(2m)} \quad x_0\right)^{1/2m}$$

$$\lambda^{-1/2m} exp\left(\lambda S(x_0)\right)\left(f(x_0) + O(\lambda^{-1/2m})\right).$$

Действительно, метод перевала применим к интегралу в левой части уравнения (15) в случае переобозначений:

$$s_k(x) = \int_0^x \frac{\theta_k}{\sigma}dx\,. \qquad (16)$$

Как следует из (3), (11), (16), если $a_k \in C^\infty[0,l]$, то $f(x)$, $s_k(x) \in C^\infty[0,l]$, то есть функции удовлетворяют условиям гладкости, допускающим применение к ним метода перевала. Формально параметр λJ входит также в функцию s, находящуюся под интегралом. Однако в действительности функция s, соответствующая проводимости ЭК, ограничена, как следует из исследования задачи ИЭФ методом касательных [5] (установлено, что функции a_k ограничены сверху некоторыми расчетными константами). Найдем критическую точку функции (16), используя соотношения (3) и (9): $s_k'(x) = 0$, $sh(\psi - \psi_k) = 0$, $\psi - \psi_k$, а значит, экстремум достигается в изоэлектрической точке $x = x_k$. Кроме того,

$$s_k''(x) = \frac{\theta_k'}{\sigma}\psi_x' - \theta_k\frac{\sigma'}{\sigma^2}, \qquad s_k''(x_k) = \frac{\theta_k'(\psi_k)}{\sigma(x_k)}\psi_x'(x_k)\,. \qquad (17)$$

Ясно, что $s_k''(x_k) \ne 0$, $s_k''(x_k) < 0$, а это означает, что $x = x_k$ является точкой максимума. Применение метода перевала к уравнению (15) дает формулу:

$$a_k(x) = m_k\phi_k(x)(\phi_k(x_k)\sqrt{-\frac{2\pi}{s_{k''}(x_k)\lambda J}} +$$

$$+O\left((\lambda J)^{-1}\right))^{-1}\exp\left[\lambda J\left(\int_0^x \frac{\theta_k}{\sigma}dx - \int_0^{x_k}\frac{\theta_k}{\sigma}dx\right)\right]. \qquad (18)$$

Положив в формуле (18) $x = x_k$, получим, что *функция* $a_k \in C^\infty[0,l]$, являющаяся асимптотическим решением дифференциального уравнения (10), в окрестности изоэлектрической точки $\psi = \psi_k$ может быть представлена в экспоненциальной форме:

$$a_k(x) = a_k(x_k)\frac{\phi_k(\psi)}{\phi_k(\psi_k)}\exp[\lambda J S_k(x)]\,, \qquad (19)$$

$$S_k(x) = \int_0^x \frac{\theta_k}{\sigma}dx - \int_0^{x_k}\frac{\theta_k}{\sigma}dx\,. \qquad (20)$$

ПОЛУЧЕНИЕ АСИМПТОТИКИ $\boldsymbol{\psi_x^{(n)}(x_k)}$

Как следует из формул (19), (20), для построения асимптотического решения задачи необходимо в первую очередь получить асимптотику функции $\psi(x)$. Рассмотрим формулу (13) в окрестности изоэлектрической точки. Оценим вклад отдельных сомножителей формулы в ее порядок по λJ. Примем допущение, вытекающее из вида профилей концентраций в «аномальных» режимах (рис. 1): вклад слагаемых с сомножителями a_i, $i \ne k$ в суммы уравнений (10)–(13) пренебрежимо мал по сравнению со вкладом слагаемых, содержащих сомножители a_{k-1}, a_{k+1}, в том числе

$$\sum_{k=1}^{n} a_k\theta_k^2 \approx a_{k-1}\theta_{k-1}^2 + a_{k+1}\theta_{k+1}^2\,. \qquad (21)$$

Очевидно, что, поскольку $x_{k-1} < x_k < x_{k+1}$, то

$$a_{k-1}(x_k) = a_{k-1}(x_{k-1})\frac{\phi_{k-1}(\psi_k)}{\phi_{k-1}(\psi_{k-1})}\exp[\lambda J S_{k-1}(x_k)], \quad (22)$$

$$S_{k-1}(x_k) = \int_0^{x_k}\frac{\theta_{k-1}}{\sigma}dx - \int_0^{x_{k-1}}\frac{\theta_{k-1}}{\sigma}dx = \int_{x_{k-1}}^{x_k}\frac{\theta_{k-1}}{\sigma}dx, \quad (23)$$

$$a_{k+1}(x_k) = a_{k+1}(x_{k+1})\frac{\phi_{k+1}(\psi_k)}{\phi_{k+1}(\psi_{k+1})}\exp[\lambda J S_{k+1}(x_k)], \quad (24)$$

$$S_{k+1}(x_k) = \int_0^{x_k}\frac{\theta_{k+1}}{\sigma}dx - \int_0^{x_{k+1}}\frac{\theta_{k+1}}{\sigma}dx = -\int_{x_k}^{x_{k+1}}\frac{\theta_{k+1}}{\sigma}dx \cdot \quad (25)$$

Преобразуем интеграл (23). Выполним замены: $\frac{x - x_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} = t$, $\frac{\psi - \psi_{k-1}}{\psi_k - \psi_{k-1}} = u$, $(\psi_{k+1} < \psi_k < \psi_{k-1})$, $x = (x_k - x_{k-1})t + x_{k-1}$, $dx = (x_k - x_{k-1})dt$. Получим интеграл:

$$S_{k-1}(x_k) = -(x_k - x_{k-1})\int_0^1 \frac{sh((\psi_{k-1}-\psi_k)u)}{\delta_{k-1} + ch((\psi_{k-1}-\psi_k)u)}\cdot\frac{dt}{\sigma((x_k - x_{k-1})t + x_{k-1})}. \quad (26)$$

Аналогично преобразуем интеграл (25):

$$S_{k+1}(x_k) = -(x_{k+1} - x_k)\int_0^1 \frac{sh((\psi_k-\psi_{k+1})v)}{\delta_{k+1} + ch((\psi_k-\psi_{k+1})v)}\cdot\frac{dy}{\sigma(x_{k+1} - (x_{k+1} + x_k)y)}. \quad (27)$$

В соответствии с (23), (25) введем обозначения:

$$S_{k-1}(x_k) = -\beta_{k-1}, \qquad S_{k+1}(x_k) = -\beta_{k+1}. \quad (28)$$

Как следует из (26), (27), $\beta_{k-1} > 0$, $\beta_{k+1} > 0$. Тогда с учетом (22), (24), (28) соотношение (21) может быть переписано в виде:

$$\begin{aligned}\Phi(\psi_k) &= a_{k-1}(x_k)\theta_{k-1}^2(\psi_k) + a_{k+1}(x_k)\theta_{k+1}^2(\psi_k) = \\ &= a_{k-1}(x_{k-1})\theta_{k-1}^2(\psi_k)\alpha_{k-1}\exp(-\lambda J\beta_{k-1}) + \\ &+ a_{k+1}(x_{k+1})\theta_{k+1}^2(\psi_k)\alpha_{k+1}\exp(-\lambda J\beta_{k+1}),\end{aligned} \quad (29)$$

$$\alpha_{k-1} = \frac{\phi_{k-1}(\psi_k)}{\phi_{k-1}(\psi_{k-1})}, \qquad \alpha_{k+1} = \frac{\phi_{k+1}(\psi_k)}{\phi_{k+1}(\psi_{k+1})}. \quad (30)$$

Как следует из (29),

$$\Phi(\psi_k) = O(\exp(-\lambda J\beta)), \qquad \beta = \min(\beta_{k-1}, \beta_{k+1}). \quad (31)$$

Формула (13) приводит к оценке:

$$\psi_x'(x_k) \approx -\frac{\lambda J(1+\delta_k)}{\sigma(x_k)}\cdot\frac{\Phi(\psi_k)}{a_k(x_k)}. \quad (32)$$

В случае, если достигнут аномальный режим, $a_k(x_k) = a_k^0$ [5], и оценка (32) приобретает форму:

$$\psi_x'(x_k) \approx -\lambda J\frac{(1+\delta_k)}{\sigma(x_k)}\cdot A_{k,2}(\lambda J),$$

$$A_{k,2}(\lambda J) = \frac{a_{k-1}^0}{a_k^0}\theta_{k-1}^2(\psi_k)\alpha_{k-1}\exp(-\lambda J\beta_{k-1}) + $$

$$+\frac{a_{k+1}^0}{a_k^0}\theta_{k+1}^2(\psi_k)\alpha_{k+1}\exp(-\lambda J\beta_{k+1}). \quad (33)$$

Следовательно, на основании (31) и (33)

$$\psi_x'(x_k) = O(\lambda J\cdot\exp(-\lambda J\beta)). \quad (34)$$

Отсюда с учетом формул (3), (17), (20), (33) в аномальном режиме справедлива следующая асимптотическая оценка:

$$S''(x_k) \approx -\frac{\lambda J}{\sigma^2(x_k)}\cdot A_{k,2}(\lambda J). \quad (35)$$

С учетом уравнений (13) и (35) оценим производную $\psi_x''(x_k)$. Опуская объемные и тривиальные дифференциальные и алгебраические преобразования, можно записать следующую формулу:

$$\psi''(x_k) \approx -\frac{(\lambda J)^2(1+\delta_k)}{a_k(x_k)\sigma^2(x_k)}\sum_{k=1}^{n}a_k(x_k)\theta_k^3(\psi_k). \quad (36)$$

На основании (36) применением метода математической индукции получим следующую оценку:

$$\psi_x^{(n)}(x_k) = -\frac{(\lambda J)^n(1+\delta_k)}{a_k(x_k)\sigma^n(x_k)}\sum_{k=1}^{n}a_k(x_k)\theta_k^{n+1}(\psi_k). \quad (37)$$

Асимптотическая оценка слагаемых в формуле (37) с учетом сделанного допущения приводит к формулам:

$$\psi_x^{(n)}(x_k) \approx -(\lambda J)^n\frac{(1+\delta_k)}{\sigma^n(x_k)}\cdot A_{k,n+1}(\lambda J),$$

$$A_{k,n+1}(\lambda J) = \frac{a_{k-1}^0}{a_k^0}\theta_{k-1}^{n+1}(x_k)\alpha_{k-1}\exp(-\lambda J\beta_{k-1}) + $$

$$+\frac{a_{k+1}^0}{a_k^0}\theta_{k+1}^{n+1}(x_k)\alpha_{k+1}\exp(-\lambda J\beta_{k+1}), \quad (38)$$

а значит, верна следующая асимптотическая оценка:

$$\psi_x^{(n)}(x_k) = O((\lambda J)^n\exp(-\lambda J\beta)). \quad (39)$$

УТВЕРЖДЕНИЕ

В «аномальном» режиме в окрестности изоэлектрической точки $\psi = \psi_k$ решение задачи (10)–(13) имеет вид экспоненциальной функции с рядом в показателе:

$$a_k(x) = a_k^0\frac{\phi_k(\psi)}{\phi_k(\psi_k)}\exp\left(-\sum_{n=2}^{\infty}\frac{(\lambda J)^n}{\sigma^n(x_k)}\cdot\frac{(x-x_k)^n}{n!}A_k(\lambda J)\right), \quad (40)$$

где $A_k^{n+1}(\lambda J)$ определено формулой (38).

Доказательство. На первом этапе на основе формулы Лейбница и равенства (9) получена общая формула для n-й производной функции S_k (x), определенной формулами (19), (20):

$$S_k^{(n)}(x_k) \approx \left(\frac{\theta_k}{\sigma}\right)_x^{(n-1)}\Bigg|_{x=x_k} = (\theta_k)_x^{(n-1)}\sigma^{-1} + +C_{n-1}^1(\theta_k)_x^{(n-2)}(\sigma^{-1})' + \ldots + C_{n-1}^1(\theta_k)'_x(\sigma^{-1})^{(n-1)}\Bigg|_{x=x_k}. \quad (41)$$

На втором этапе с учетом уравнения (11) и асимптотических оценок (34) и (39) применением метода математической индукции была получена следующая асимптотическая оценка:

$$\sigma^{(n)}(x_k) = O((\lambda J)^n \exp(-\lambda J\beta)). \quad (42)$$

На третьем этапе на основании формул (37), (41), (42) был сделан вывод, что $S_k^{(n)}(x_k)$ в окрестности изоэлектрической точки имеет порядок старшей производной $\psi^{(n-1)}$ по λJ: $S_k^{(n)}(x_k) \approx \psi_x^{(n-1)}(x_k)\theta'_k(x_k)/\sigma(x_k)$. Следовательно, на основании формулы (37) справедлива оценка:

$$S_k^{(n)}(x_k) \approx -\frac{(\lambda J)^{n-1}}{\sigma^n(x_k)}A_{k,n}(\lambda J). \quad (43)$$

На четвертом этапе функция $S_k(x)$ была представлена в виде стандартного ряда Тейлора, коэффициенты которого были рассчитаны с использованием формулы (43). После подстановки ряда в формулы (19), (20) была получена требуемая формулировка (40).

«ВОЛНОВАЯ» АСИМПТОТИКА ДЛЯ СЛУЧАЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Случай так называемого равномерного распределения характеризуется равномерным шагом по константам диссоциации и изоэлектрическим точкам, а также «классическим» гауссовским видом профилей концентраций. В этом случае, как следует из (3): $\psi_{k-1} - \psi_k = \psi_k - \psi_{k+1} = \Delta\psi$, $x_k - x_{k-1} = x_{k+1} - x_k = \Delta x$, $d_{k-1} = d_{k+1} = d_k$. На основании формул (26), (27), (28) $\beta_{k-1} = \beta_{k+1}$, $\alpha_{k-1} = \alpha_{k+1}$. Кроме того, $a_{k-1}^0 = a_k^0 = a_{k+1}^0 = a_0$. Как следует из формул (9) и (34), для равномерного распределения $\psi\ \theta_{k-1} = \theta_{k+1}$, а значит,

$$S_k^{(2n-1)}(x_k) = 0,$$

$$S_k^{(2n)}(x_k) = -(\lambda J)^{2n-1}\frac{2\alpha_{k-1}\theta_{k-1}^{2n}(x_k)}{\sigma^{2n}(x_k)}\exp(-\lambda J\beta_{k-1}).$$

Следовательно, для равномерного распределения формула (40) принимает вид:

$$a_k(x) = a^0\frac{\phi_k(\psi)}{\phi_k(\psi_k)}\exp\left(-2\alpha_{k-1}\sum_{n=2}^{\infty}\frac{(\lambda J)^{2n}\exp(-\lambda J\beta_{k-1})}{\sigma^{2n}(x_k)(2n)!}(x-x_k)^{2n}\theta_{k-1}^{2n}(x_k)\right), \quad (44)$$

Введем в рассмотрение обозначение для общего члена ряда в показателе экспоненты (44):

$$u_n(x,\lambda_0) = \frac{(\lambda_0)^{2n}\exp(-\lambda_0\beta_{k-1})}{\sigma^{2n}(x_k)(2n)!}(x-x_k)^{2n}\theta_{k-1}^{2n}(x_k), \qquad \lambda_0 = \lambda J.$$

Применением стандартной теории числовых и функциональных рядов нами были доказаны следующие свойства данного ряда (который далее будем называть волновым).

1. Ряд сходится абсолютно при любых конечных значениях x и λ_0. Действительно, в силу наличия факториала в знаменателе

$$\lim_{n\to\infty}\left|\frac{u_{n+1}(x,\lambda_0)}{u_n(x,\lambda_0)}\right| = \frac{\lambda_0^2(x-x_k)^2\theta_{k-1}^2(\psi_k)}{\sigma^2(x_k)(2n+1)(2n+2)} = 0 < 1,$$

значит, волновой ряд сходится при любых конечных значениях x и λ_0.

2. Функция $u_n(x, \lambda_0)$ по параметру λ_0 представляет собой асимметричную волну (рис. 2), наибольшее значение которой равно:

$$u_n(x,\lambda_0^{max}) = u_n\left(x, \frac{n}{\beta_{k-1}}\right) = \frac{(2n)^{2n}}{\beta_{k-1}^{2n}}\cdot e^{-2n}\cdot\frac{(x-x_k)^{2n}\theta_{k-1}^{2n}(\psi_k)}{\sigma^{2n}(x_k)(2n)!}.$$

Действительно, максимум функции $f_n(\lambda_0) = (\lambda_0)^{2n}exp(-\lambda_0\beta)$, входящей в $u_n(x, \lambda_0)$ в качестве сомножителя, находится в точке $M(n/\beta, (n/\beta)^n)$, откуда и вытекает свойство.

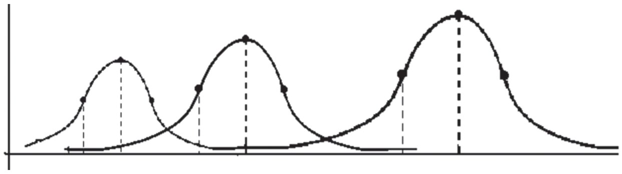


Рис. 2. Схематический чертеж взаимного расположения графиков функций $f_{2n}(\lambda_n)$

3. Для любого значения параметра λ_0 существует конечное число «волн» $u_n(x, \lambda_0)$, таких, что $|u_n(x, \lambda_0)| > \varepsilon$, где ε – любое сколь угодно малое число. Действительно, пусть $\lambda_0^{n,n+k}$ – значение λ, при котором пересекаются n-я и $(n+k)$-я волны. Тогда на основании простейших алгебраических преобразований, метода математической индукции и асимптотической формулы Стирлинга получим, что $\lim_{n\to\infty}u_n(x,\lambda_0^{n,n+k}) = 0$.

Таким образом, исследование свойств рядов показало, что для каждого значения плотности тока J имеется конечное число членов ряда, обладающих существенным вкладом в сумму ряда; остальными слагаемыми можно пренебречь в силу их малости. Как следует из формулы (44), функция a_k, являющаяся решением жесткой задачи ИЭФ для равномерного распределения в окрестности изоэлектрической точки, представляет собой экспоненциальную функцию с конечным числом четных степеней $(x - x_k)^{2l}$ в показателе, величины l увеличиваются при возрастании плотности тока J. Между тем «плато» на вершине профиля функции $exp(-x^{2k})$ тем шире, чем больше значение l в показателе функции. Проведенный анализ объясняет поведение профилей концентраций в «аномальных» режимах и указывает формулу, являющуюся обобщением гауссовского решения для жесткой интегро-дифференциальной задачи ИЭФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б а б с к и й В. Г., Ж у к о в М. Ю., Ю д о в и ч В. И. Математическая теория электрофореза: Применение к методам фракционирования биополимеров. Киев: Наукова думка, 1983. 202 с.
2. Ж у к о в М. Ю. Массоперенос электрическим полем. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского гос. ун-та, 2005. 216 с.
3. С а х а р о в а Л. В. Исследование механизма трансформации гауссовского распределения концентраций при аномальных режимах изоэлектрического фокусирования // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кавк. регион. Естественные науки. 2012. № 1. С. 30–36.
4. С а х а р о в а Л. В. Критерий выхода системы изоэлектрического фокусирования в «аномальный» режим // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. 2012. № 3 (21). С. 38–42.
5. С а х а р о в а Л. В. Численный анализ интегро-дифференциальной задачи изоэлектрического фокусирования в «гипергауссовских» режимах // Вестник Тюменского гос. ун-та. Физ.-мат. науки. 2012. № 4. С. 137–144.
6. Ф е д о р ю к М. В. Метод перевала. М.: Наука, 1977. 268 с.
7. T h o r m a n n W., M o s h e r R. A. High-resolution computer simulation of the dynamics of isoelectric focusing using carrier ampholytes: The post-separation stabilizing phase revisited // Electrophoresis. 2002. № 23. P. 1803–1814.
8. R i g h e t t i P. G. Isoelectric focusing: Theory, Methodology and Application. Elsevier Biomedical Press. N. Y.; Oxford: Elsevier, 1983. 386 p.
9. T h o r m a n n W., M o s h e r R. A. High-resolution computer simulation of the dynamics of isoelectric focusing using carrier ampholytes: Focusing with concurrent electrophoretic mobilization is an isotachophoretic process. Research Article // Electrophoresis. 2006. № 27. P. 968–983.
10. Z i l b e r s t e i n G. V., B a s k i n E. M., B u k s h p a n Sh. Parallel processing in the isoelectric focusing chip // Electrophoresis. 2003. № 24. P. 3735–3744.

Sakharova L. V., Branch of Admiral Ushakov Maritime State University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

"WAVE" ASYMPTOTIC SOLUTION OF ISOELECTRIC FOCUSING PROBLEM

The article is concerned with asymptotic analysis of Isoelectric Focusing (IEF) mathematical model in the so-called "anomalous" regimen. The integro-differential problem is a mathematical description of the IEF problem. It consists of N differential equations, algebraic equations, and N integral equations. Solutions of the problem are analytical concentrations of ampholytes. Its graphics (so-called profiles of ampholytes) in trivial regimen have the form of the Gaussian curves. In "anomalous" regimen, under high current densities of J, a breakdown of the Gaussian distribution takes place. The "plates'' on the tops of the graphics appear and widen with the increase of J. As long as Gaussian distribution is one of the most important laws of mathematical physics, its breakdown constitutes an essential scientific interest. Is the Gaussian distribution a partial case of a more common distribution? What formula is expressed in its distribution? In the present article the asymptotic solution of the IEF problem is obtained. It establishes the form of the non-Gaussian distribution by concentrations in the ``anomalous'' regimen. The application of the saddle-point method to the integro-differential problem allows provision of its solution in the form of exponent with the power ("wave") series in the exponent. By means of asymptotic methods it is established that for each value of J (current density) only a finite number has essential contribution to the sum of the series. Remaining terms are negligible as infinitesimal terms. For the uniform distribution of ampholytes the solution is an exponential function with finite number by even degrees (x-xk)2l in exponential. The magnitude l is increased under magnification of the current density J. It is known, that "the plate" on the top of the graphics by function exp(-x2k) widens with high values of l in exponential. The developed analysis explains the behavior of profiles in "anomalous" regimen. It indicates the formula, which is a generalization of Gaussian distribution for integro-differential IEF problem.

Key words:: integro-differential problem; Gaussian function; "wave" series

REFERENCES

1. B a b s k i j V. G., Z h u k o v M. Yu., Y u d o v i c h V. I. Mathematical theory of electrophoresis: application to the methods of fractionation by biopolymeric [Matematicheskaya theoriya elektroforeza: Primenenie k metodam fraktsionirovaniya biopolimerov]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 202 p.
2. Z h u k o v M. Yu. Massoperenos elektricheskim polem [Mass transport by the electric field]. Rostov-on-Don, Izd-vo Rost. Gos. Un-ta, 2005. 216 p.
3. S a k h a r o v a L. V. Investigation of Transformation Mechanism of the Gaussian Distribution with Anomalous Concentrations of Isoelectric Focusing Models [Issledovaniye mekhanizma transformatsii gaussovskogo raspredeleniya kontsentratsiy pri anomal'nykh rezhimakh izoelektricheskogo fokusirovaniya]. Izvestiya vysshih ychebnykh zavedeniy. Sev.-Kavk. Region. Estestvennye nauki. 2012 № 1. P. 30–36.
4. S a k h a r o v a L. V. The investigation of "hyper-gaussian" regimen by integro-differential problem of isoelectric focusing by means of numerical methods [Chislenniy analiz integro-differentsial'noy zadachi izoelektricheskogo fokusirovaniya v "gipergaussovskikh" rezhimakh] // Vestnik Tyumenskogo gos. un-ta. Fiz.-mat. nauki. 2012. № 4. P. 137–144.
5. S a k h a r o v a L. V. The criterion of trasformation of isoelectric focusing system to the "anomalous" regimen by asymptotic methods [Kriteriy vykhoda sistemy izoelektricheskogo fokusirovaniya v anomal'nyy rezhim]. Vector nauki Tol'yattinskogo gos. un-ta. № 3 (21). 2012. P. 38–42.
6. F e d o r y u k M. V. Metod perevala [Saddle-point method]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 268 p.
7. T h o r m a n n W., M o s h e r R A. High-resolution computer simulation of the dynamics of isoelectric focusing using carrier ampholytes: The post-separation stabilizing phase revisited // Electrophoresis. 2002. № 23. P. 1803–1814.
8. R i g h e t t i P. G. Isoelectric focusing: Theory, Methodology and Application. Elsevier Biomedical Press. N. Y.; Oxford, Elsevier, 1983. 386 p.
9. T h o r m a n n W., M o s h e r R. A. High-resolution computer simulation of the dynamics of isoelectric focusing using carrier ampholytes: Focusing with concurrent electrophoretic mobilization is an isotachophoretic process. Research Article // Electrophoresis. 2006. № 27. P. 968–983.
10. Z i l b e r s t e i n G. V., B a s k i n E. M., B u k s h p a n Sh. Parallel processing in the isoelectric focusing chip // Electrophoresis. 2003. № 24. P. 3735–3744.

Поступила в редакцию 11.10.2012

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ

К 60-летию со дня рождения

3 мая 2013 года исполнилось 60 лет доктору химических наук, профессору кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета Петрозаводского государственного университета *Владимиру Петровичу Андрееву.*

В. П. Андреев родился в г. Петрозаводске. После обучения в химико-биологическом классе физико-математической школы-интерната № 45 при Ленинградском государственном университете поступил на химический факультет ЛГУ, в 1979 году – в аспирантуру при ЛГУ с защитой кандидатской диссертации, а в 2007 году защитил в Московской академии тонкой химической технологии докторскую диссертацию. С 1979 года В. П. Андреев начинает работу в Петрозаводском университете, а в 2008 году становится профессором кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии. С 1986 по 1989 год после окончания курсов португальского языка при ЛГУ находился на педагогической работе в университете Эдуарду Мондлане города Мапуту в Народной Республике Мозамбик, где был заместителем заведующего кафедрой факультета de Ciencias и руководителем группы советских химиков.

Список публикаций В. П. Андреева включает 150 научных статей (2 авторских свидетельства и монографию), тезисов конференций и учебно-методических пособий (15 пособий, из них два учебника на португальском языке). Под его руководством и соруководством защищены 5 кандидатских диссертаций. Работа по теме «Молекулярные комплексы гетероароматических N-оксидов» дважды финансировалась грантами Международного научного фонда (NFX 000 и NFX 300). Дважды (в 1998 и 2000 годах) «in recognition and appreciation of outstanding contributions to world science and science education» Международным комитетом В. П. Андрееву было присуждено почетное звание Соросовского доцента. В настоящее время является участником нескольких грантов, руководителем экспериментальной работы, выполняемой в рамках программы «У.М.Н.И.К.» и финансируемой Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

За многолетнюю плодотворную научно-педагогическую деятельность Владимир Петрович награжден грамотой Министерства образования РФ, нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

Поздравляем Владимира Петровича с юбилеем и желаем ему новых свершений в науке и педагогической деятельности!

Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета»

17 мая 2013 года исполнилось 60 лет доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета Петрозаводского государственного университета, члену редколлегии научного журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета» *Генриху Болеславовичу Стефановичу.*

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ

К 60-летию со дня рождения

После окончания средней школы в д. Кяппясельга Кондопожского района Г. Б. Стефанович поступил на физико-математический факультет Петрозаводского госуниверситета, который закончил с отличием в 1975 году. После окончания университета был направлен на работу в г. Шауляй, где работал инженером, а затем мастером завода «Нуклон» Министерства электронной промышленности СССР. В 1978 году он вернулся в Петрозаводский университет научным сотрудником отраслевой лаборатории «Физика окисных пленок». В 1987 году Г. Б. Стефанович защитил кандидатскую диссертацию в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе по специальности «физика полупроводников и диэлектриков», в 1998 году – докторскую диссертацию в Санкт-Петербургском техническом университете. С 1998 года он заведующий кафедрой геологии и геофизики горно-геологического факультета, с 2004 года профессор, с 2010 года Генрих Болеславович является заведующим кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники.

В период с 1997 по 2000 год Г. Б. Стефанович работал в Лос-Анджелесе (США) в компании АРТ, а с 2005 по 2009 год – научным консультантом фирмы «Самсунг» в Южной Корее.

Область научных интересов Г. Б. Стефановича охватывает проблемы физики окисных пленок и разработку на их основе компонентной базы оксидной электроники. Им опубликовано более 130 научных работ и 6 методических пособий. Он неоднократно являлся участником выставок, в 2012 году разработки, выполненные под его руководством, были отмечены дипломами и медалями: золотой («Электронные компоненты для 3D микро- и наноэлектронных устройств, гибкой и прозрачной электроники») и серебряной («Гетероструктуры на основе оксидных пленок для применения в 3D энергонезависимой памяти с наноразмерным масштабом компонентов»). Под его руководством защищены 4 кандидатские диссертации.

За заслуги в развитии науки и большой вклад в подготовку научных кадров в 2004 году Генриху Болеславовичу присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Карелии».

Поздравляем Генриха Болеславовича с юбилеем и желаем ему новых достижений в научной и педагогической деятельности!

Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета»

ХРОНИКА

■ 3–7 июня 2013 года в Петрозаводском государственном университете прошла XII международная конференция «Физика в системе современного образования – ФССО-2013».

В конференции приняли участие преподаватели высшей школы, научные работники, учителя, издатели физико-математической литературы и производители физического оборудования. Всего свыше 130 человек из России (Москвы, Санкт-Петербурга, Ярославля, Казани, Йошкар-Олы, Пензы, Братска, Иркутска, Саратова, Челябинска, Волгограда, Петрозаводска и др.) и США. Цель конференции – обмен опытом специалистов в области преподавания физики и координация усилий в развитии физического образования на всех уровнях – от школы до вуза.

Работа конференции проходила по следующим секциям: «Профессиональное физическое образование», «Физика в системе инженерного образования», «Физика в системе естественнонаучного образования», «Подготовка педагогических кадров по физике», «Физика в системе общего среднего образования», «Информационные и коммуникационные технологии в преподавании физики», «Физика в современной естественно-научной картине мира», «Проблемы математической подготовки физиков». Кроме пленарных и секционных заседаний во время работы конференции прошли круглые столы по актуальным проблемам физического образования. В программу конференции вошли выставки учебного оборудования, презентация компьютерных моделей и программ по физике, посещение «Музея науки» ПетрГУ. По итогам конференции будет издан сборник докладов.

Мероприятие прошло при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 годы.

Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета» приносит свои извинения авторам статьи **«Синтез карбидов в плазме дугового разряда и их идентификация» В. И. Подгорному, Б. З. Белашеву, Р. Н. Осауленко, А. Н. Терновому**, опубликованной в журнале «Ученые записки Петрозаводского государственного университета», серия «Естественные и технические науки», 2013, № 2 (131), С. 78–83, в связи с пропущенной ссылкой: «**Работа поддержана Министерством образования РФ, программа: «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проекты № 14. В 37.21.1066; № 14. В 37.21.0755)**».

CONTENTS