

УДК 550.462+502.64

## ДЕНДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ПЕРЕНОСОВ ЭКОТОКСИКАНТОВ НА ТЕРРИТОРИЮ АЛТАЯ

Ю.В. Робертус, Л.П. Рихванов\*, Р.В. Любимов

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

E-mail: ariecol@mail.gornyy.ru

\*Томский политехнический университет

E-mail: rikhvanov@tpu.ru

*Показана возможность оценки трансграничных переносов с использованием годовых колец деревьев. Установлено воздействие на экосистему Западного Алтая как минимум трёх источников: перерабатывающие предприятия Восточного Казахстана, ядерные испытательные полигоны, освоение степных озёр Кулунды и целинных земель.*

### **Ключевые слова:**

*Горный Алтай, геохимия, годовые кольца деревьев, мониторинг, дендрогеохимия, трансграничный перенос.*

### **Key words:**

*Mountain Altai, geochemistry, annual rings of trees, monitoring, dendrogeochemistry, transboundary carrying over.*

### **Постановка задачи и актуальность исследований**

Известно, что источниками трансграничных переносов загрязняющих веществ являются выбросы промышленных центров, которые формируют значительные по размерам техногенные биогеохимические провинции с аномально повышенным уровнем присутствия широкого спектра экотоксикантов в объектах окружающей среды.

Одним из основных индустриальных центров, предположительно влияющих на территорию Алтая, является Восточно-Казахстанская область (ВКО), где сосредоточен ряд крупных металлургических комбинатов, ежегодно выбрасывающих в атмосферу до 150...200 тыс. т загрязняющих веществ. Другим источником загрязнения атмосферы являются токсичные отходы промышленных предприятий области – более 1,5 млрд т [1].

В недалеком прошлом Западный Алтай, на территории которого отсутствуют промышленные объекты, многократно подвергался радиационному воздействию при прохождении облаков от наземных и воздушных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне (СИП) и полигоне оз. Лобнор (Западный Китай) [2]. Следы прошлого радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды, в том числе стратифицированных образований

(ледники, донные осадки, годовые кольца деревьев), установлены на всей территории Алтая [3–5].

В настоящее время проблема аэрогенного переноса на приграничную с Казахстаном территорию Алтая разнообразных тяжелых и токсичных металлов, присутствующих в выбросах и отходах предприятий горно-металлургического цикла ВКО, изучена слабо.

Отдельными работами 1990-х гг. предварительно установлен значительный (до 150 км) перенос на территорию Алтайского края содержащих тяжелые металлы (ТМ) отходов Жескентского и Алтайского горно-обогатительных комбинатов, а также распространение выбросов предприятий цветной металлургии г. Усть-Каменогорска, преимущественно в северо-восточном направлении, вплоть до административной границы ВКО с Республикой Алтай.

Также следы трансграничного переноса отходов с территории ВКО в виде участков локального загрязнения элементами полиметаллических руд снегового и почвенного покрова в западной части Республики Алтай были выявлены ОАО «Алтай-Гео» в 1990-х гг. в процессе геоэкологических исследований и картографирования масштаба 1:1000000.

Имеются и другие прямые доказательства аэрогенного переноса тяжелых металлов (свинец, цинк,

медь, кадмий, таллий и др.) на территорию Горного Алтая, в частности, данные о повышенном содержании типоморфных элементов полиметаллических руд – меди, цинка, свинца – в водно-ледниковых объектах Южного Алтая, полученные в 1990-х гг. Томским государственным университетом и территориальным центром «Алтайгеомониторинг» [6, 7].

Новейшие данные, полученные Томским политехническим университетом при послыйном опробовании ледникового массива Бол. Актру (Северо-Чуйский хребет), показали наличие тесной ассоциации и повышенного содержания в ледниковой воде основных элементов руд, перерабатываемых на предприятиях ВКО (медь, свинец, цинк, кадмий, барий), и сопутствующих им ртути, таллия, висмута, золота, рения [4]. Это свидетельствует об их одновременном и обособленном от других элементов поступлении с трансграничными пылеаэрозольными переносами с сопредельной территории Восточного Казахстана.

Приведенные в настоящей статье предварительные данные по использованию биогеохимических особенностей годичных колец деревьев в целях ретроспективного анализа прошлого трансграничного загрязнения тяжелыми металлами территории Алтая получены впервые. Ранее эти стратифицированные образования применялись только для выявления методом *f*-радиографии следов радиационного воздействия на окружающую среду [3].

#### Материалы и методы исследования

Для проверки предположения о фиксации древесной растительностью следов трансграничных переносов экотоксикантов на территорию Алтая, нами были проанализированы в ядерно-геохимической лаборатории МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ (г. Томск) методом инструментального нейтронно-активационного анализа на комплекс из

28 элементов образцы древесной золы годичных колец лиственницы и кедра. Срезы взяты в 12 точках вблизи населенных пунктов: Коргон, Кайсын, Кырлык, Абай, Огневка (профиль I-I), Куяган, Барагаш, Верх-Ябоган, Ело, Иня (профиль II-II), Бийка, Обога (профиль III-III). В каждом спиле дерева было отобрано по 8 проб, включающих годовые кольца десятилетних периодов: 1930–1939, 1940–1949, 1950–1959, 1960–1969, 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2009 гг. Лаборатория имеет соответствующие аттестации и аккредитации. Достоверность анализа многократно проверена международными стандартами.

Необходимо отметить, что вышеотмеченные пункты отбора спилов приурочены к эпицентральной части ранее выявленного на территории Западного Алтая языкообразного мегаореола аномально пониженных значений pH и повышенного содержания сульфатов, нитритов, нитратов и ряда ТМ в талой воде снеговых проб, что свидетельствует о поступлении на Алтай осадков, загрязненных кислотными выбросами предприятий ВКО (рис. 1).

#### Обсуждение результатов

Содержание изученных элементов в золе лиственницы за период 1930–2009 гг. варьируется в значительных пределах и, как правило, превышает региональный фон в 2...5 раз, для отдельных элементов – до 10...15 раз. За региональный фон условно принят период 1930–1939 гг., характеризующийся минимальным содержанием большинства элементов (табл. 1).

Полученные данные позволили выделить три основные и два второстепенные периода повышенного поступления на территорию Алтая изученных элементов. Первые из них соответствуют 1940-м, 1960-м, 1980-м, а вторые – 1950-м и 1970-м годам прошлого столетия и вероятно связаны с основными



Рис. 1. Мегаореол загрязнения объектов окружающей среды в Западном Алтае

этапами ядерных испытаний на ближайших к Алтаю полигонах – Семипалатинском и, частично, Лобнор.

**Таблица 1.** Среднее содержание элементов (мг/кг) в золе лиственницы в Западном Алтае (профили I, II)

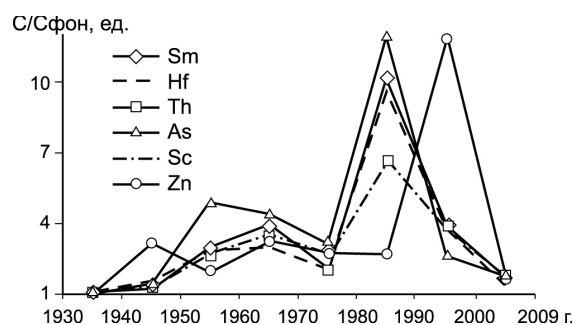
Элементы	1930–1939*	1940–1949	1950–1959	1960–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009
Sm	1,17	1,26	1,31	1,40	1,23	1,43	0,86	0,70
Ce	14,6	16,0	14,9	17,0	14,3	17,8	9,4	9,8
Lu	0,092	0,094	0,084	0,108	0,092	0,108	0,079	0,052
U	0,49	0,55	0,47	0,66	0,45	0,36	0,27	0,46
Th	1,79	1,81	1,68	2,15	1,90	1,85	1,44	1,23
Cr	243,1	524,3	282,5	366,1	281,7	304,8	202,6	161,4
Yb	0,58	0,51	0,55	0,69	0,50	0,59	0,44	0,45
Hf	1,21	1,27	0,99	1,41	1,38	1,28	0,87	0,60
Nd	12,8	13,5	11,8	11,4	13,2	13,8	1,5	2,9
As	3,6	4,5	7,1	4,5	3,6	4,4	2,8	2,8
Ag	4,41	5,38	6,42	6,95	8,25	5,60	5,10	1,80
Br	11,5	8,1	17,3	15,1	8,9	8,1	7,7	9,3
Cs	1,46	1,72	1,78	2,42	2,96	1,96	1,88	1,31
Tb	0,176	0,205	0,190	0,224	0,175	0,174	0,127	0,082
Sc	2,89	2,91	2,64	3,20	2,73	3,51	2,24	1,79
Zn	969	785	1454	1200	1023	971	2499	1157
Na, %	0,84	1,08	0,90	1,13	1,02	1,05	0,77	0,64
La	6,9	7,7	6,4	8,8	7,7	7,2	6,0	5,4
Sb	1,40	2,34	4,46	2,49	1,95	1,22	1,06	0,95

\*Региональный фон. Выделены максимальные (черным) и субмаксимальные (серым) концентрации

Так, максимум поступления большинства элементов проявлен в период 1960-х гг, в начале которого (1961–1962 гг.) была произведена большая серия наземных ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. В это время в западной и северной частях Горного Алтая было зафиксировано более десяти радиоактивных следов этих взрывов [2].

Биогеохимический спектр элементов 1940-х и 1960-х гг. весьма близок между собой, из чего можно предполагать, что геохимические особенности первого из этих периодов обусловлены ядерным взрывом на СИП 29 августа 1949 г., следы которого проявились на всей территории Алтая. В этой связи необходимо отметить, что проявленные в годичных кольцах геохимические особенности 1970–1980-х гг. – периода массовых ядерных взрывов на полигоне оз. Лобнор – в целом отличаются от советских испытаний на СИП.

В то же время геохимический спектр менее интенсивно проявленного периода 1950-х гг., во время которого происходили ядерные взрывы на СИП, во многом идентичен 1940-м и 1960-м гг. Более слабо проявленные геохимические особенности семидесятых годов во многом сходны с восьмидесятыми годами и предположительно обусловлены ядерными испытаниями на полигоне Лобнор (рис. 2).



**Рис. 2.** Надфоновое содержание элементов (C/Cфон) в золе лиственницы из пункта Кайсын

Установлено, что минимальные отношения «индикаторных» элементов были проявлены в довоенный период и увеличивались вплоть до 1990-х гг. Максимальные концентрации изученных элементов проявились в разные периоды: щелочных металлов (Ca, Ba, Sr) – в 40-е гг.; мышьяка и сурьмы – в 50-е гг.; тория, урана и РЗЭ – в 60–80-е гг. и т. д. (табл. 2).

Примечательно, что максимумы РЗЭ приурочены к основным периодам ядерных испытаний (1960–1980-е гг.), а элементов полиметаллических руд – к концу советского периода (1970–1990-е гг.) с наибольшими объемами выбросов предприятий Восточного Казахстана.

**Таблица 2.** Отношение средних концентраций элементов в золе лиственницы в 1930–2009 гг.

Годы	Отношение средних концентраций элементов, %						Максимумы содержания элементов по десятилетиям
	Rb/Cs	Th/U	La/Ce	Sm/Nd	Ba/Sr	Na/Fe	
2000–2009	73	267	55	24	151	71	–
1990–1999	81	533	64	57	151	77	Zn
1980–1989	74	514	40	10	193	52	Sm, Ce, Lu, Nd, Sc, Co, Au
1970–1979	69	422	54	9	176	78	Ag, Ta, Cs, Rb
1960–1969	58	326	52	12	164	81	Na, U, Th, Yb, Hf, Tb, Eu, La
1950–1959	58	357	48	11	151	75	As, Sb
1940–1949	55	329	48	9	159	77	Ca, Ba, Sr, Cr
1930–1939	52	365	47	9	127	70	–

Выделены минимальные (серым) и максимальные (черным) отношения концентраций элементов.

**Таблица 3.** Отношение средних содержаний элементов в золе деревьев по изученным профилям

Элементы	Ce	U	Yb	Fe	Au	Sr	As	Br	Sb	Sc	La	Среднее
Профили I/II	1,26	1,07	1,12	1,20	1,00	1,24	1,07	1,27	1,42	1,23	1,19	1,19
Профили I/III	0,26	0,48	0,14	0,31	0,41	0,13	0,36	0,30	0,52	0,27	0,29	0,32

При анализе отношения средних концентраций элементов в спилах деревьев изученных профилей установлено, что на профиле I–I их содержание в среднем на 19 % выше, чем на отстоящем в 30...50 км восточнее профиле II–II, и в 3 раза выше, чем в районе Телецкого озера (табл. 3). С учетом этих данных, можно считать, что при удалении от предполагаемого источника в восточном направлении градиент уменьшения концентраций элементов составляет от 0,5 % на 1 км в западной части вышесотмеченного мегаореола до 1,5 % в его восточной

части, т. е. происходит прогрессирующее уменьшение интенсивности трансграничного загрязнения.

По результатам факторного анализа и величине превышения регионального фона среди изученных элементов выделяется три основных группы: первая представлена относительно слабо концентрированными РЗЭ, кобальтом, торием и др.; вторая – элементами полиметаллических руд (Ba, Ag, Zn, As, Au) с более высоким надфоновым уровнем присутствия; третья – щелочными и щелочноземельными металлами, а также бромом (Ca, Na, Cs, Rb, Vg и др.), для которых характерно максимальное превышение фоновых концентраций.

Эти же группы установлены при корреляционном анализе связей элементов. Так, большинство элементов 1-й группы имеют между собой тесные положительные связи. Для ассоциации элементов полиметаллических руд характерны, в основном, малозначимые и отрицательные связи. Элементы 3-й группы имеют промежуточные показатели (табл. 4).

**Таблица 4.** Группировка изученных элементов (по данным факторного и корреляционного анализов)

Показатели распределения элементов	1-я группа	2-я группа	3-я группа
	Fe, Co, Sm, Ce, Lu, Yb, Hf, La, Sc, Th, U	Ba, Sb, As, Zn, Ag, Au	Ca, Na, Cs, Br, Rb
Число связей: min ...max/ $\bar{X}$	9...11/10	0...3/2	3...5/4
Величина связей: min ...max/ $\bar{X}$	0,48...0,56/0,53	0,25...0,42/0,32	0,37...0,48/0,43
Превышение фона (ед.): min ...max/ $\bar{X}$	1,2...1,3/1,2	1,50...3,2/3,0	2,5...35/5,5

Анализ дендрологических особенностей поведения во времени изученных элементов свидетельствует о том, что, несмотря на эпизодические аномальные повышения в 1940–1980-х гг. регионального фона, в связи с трансграничными переносами вышеотмеченных загрязняющих веществ, для большинства элементов во второй половине XX в. характерны стабильные и даже регрессивные тренды уровней присутствия (рис. 3). В последнем случае не исключено влияние физиологических процессов, в частности «сокодвижения» в зоне роста деревьев (оболони), приводящего к частичному уменьшению содержания элементов в более молодых го-

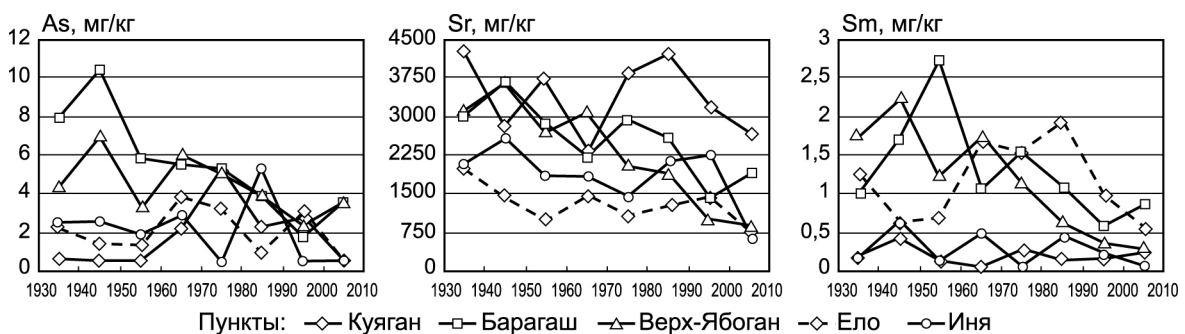
дичных кольцах. По мнению авторов, этот вопрос нуждается в дальнейшем углубленном изучении.

Пространственное распределение концентраций многих элементов в годичных кольцах изученных спилов в большинстве случаев имеет черты зональности, уменьшения содержания и ориентации в восток-северо-восточном направлении, т. е. в направлении следов прохождения бывших радиоактивных облаков с Семипалатинского полигона и вытянутости мегаореола выпадения кислотных осадков, поступающих с трансграничными переносами выбросов горно-металлургических предприятий Восточного Казахстана (рис. 4).

Для пространственного распределения в годичных кольцах элементов 3-й группы, в частности, цезия и брома, проявлено уменьшение содержания в направлении с северо-запада на юго-восток, что свидетельствует об их поступлении при пыльных бурях со Степного Алтая, возможно с территории соленых озер Кулундинской впадины. Об этом свидетельствует и время проявления их максимального поступления – после 1950-х гг., т. е. после начала активного освоения целинных земель и разработки месторождений солей региона (рис. 4).

Следует обратить внимание на неоднородный характер поступления химических элементов на территорию, рис. 3. Так, в период 1940–1949 гг. максимум их концентрирования в годовых кольцах деревьев фиксируется в сёлах Верхний Ябоган и Барагаш, тогда как в период 1980–1989 гг. максимум накопления металлов отмечается в с. Кайсын. В этом населённом пункте отмечается наибольшая частота встречаемости максимальных концентраций элементов (10 из 28). Годовые кольца с. Ело, характеризующие период 1970–1979 гг., содержат максимальное количество Та (4 г/т), тогда как максимум Au отмечается в районе с. Барагаш (1,2 г/т) в годовых кольцах временного периода 1950–1959 гг. и Кайсын (1,5 г/т) – временного периода 1980–1989 гг.

Можно утверждать, что в настоящее время идёт становление нового дендрогеохимического направления в геохимических методах оценки состояния природной среды. Годичные кольца древесных растений, образуясь последовательно во времени, фиксируют в своём составе элементный состав текущего окружения и поэтому представляют огромный интерес в качестве объектов для изучения динамики изменения геохимического состава биосферы.



**Рис. 3.** Тренды изменения концентрации элементов в годичных кольцах лиственницы

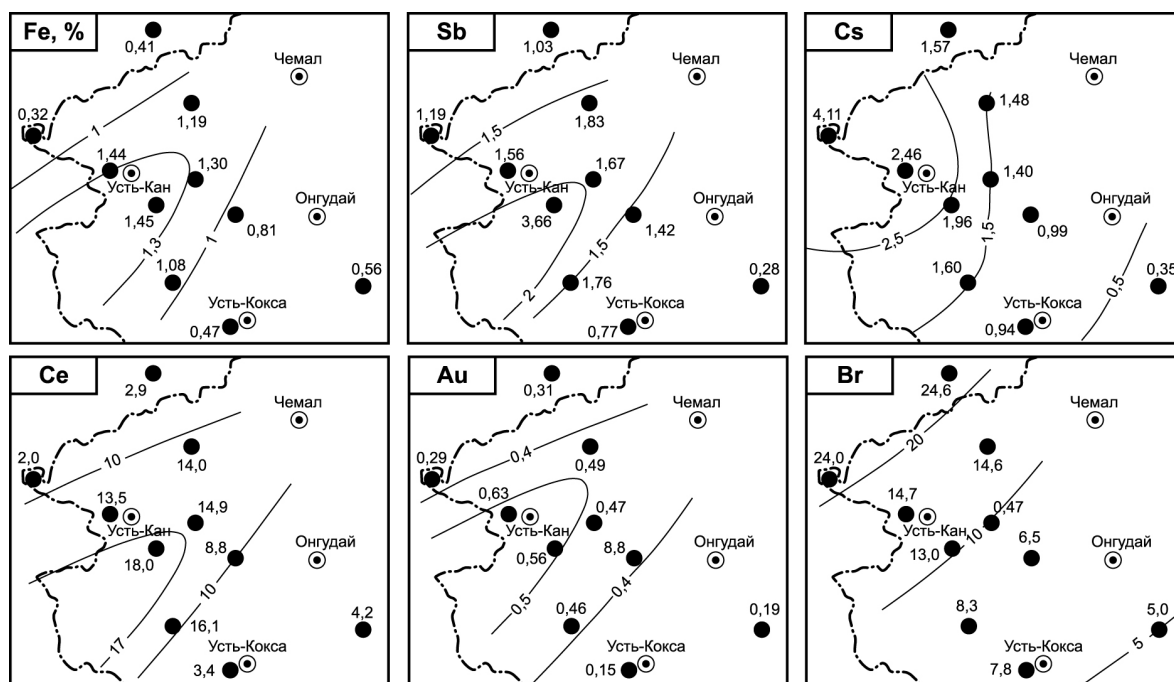


Рис. 4. Пространственное распределение элементов (мг/кг) в годичных кольцах лиственницы в Западном Алтае

**Выводы**

1. Западная часть Горного Алтая на протяжении последних 60 лет подвергается загрязнению вследствие трансграничных переносов техногенных радионуклидов и тяжелых металлов, главным образом, с территории Восточного Казахстана.
2. В этой части региона имели место несколько периодов поступления химических элементов, основные из которых предположительно связаны со временем воздушных и наземных ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне и полигоне Лобнор (Китай).
3. Изученные элементы представлены тремя основными группами: первая – РЗЭ, торием, ураном и др., поступившими при прошлом радио-

- активном загрязнении территории Алтая; вторая группа – элементами перерабатываемых полиметаллических руд (цинк, серебро, мышьяк, сурьма и др.); третья группа – щелочными металлами и галогенидами, предположительно поступающими при их трансграничных переносах с территории Степного Алтая.
4. В пространственном распределении ассоциации элементов, характерных для обрабатываемых полиметаллических руд, в спилах деревьев проявились черты зонального строения, уменьшения содержания и ориентации изоконцентратов в направлении вытянутости мегаореола выпадения кислотных осадков, поступающих от горно-металлургических предприятий Восточного Казахстана.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Данилова Н.Г., Чапаева Г.В. Экологический мониторинг состояния окружающей среды Восточно-Казахстанской области в 1999 году // Наш общий дом: Матер. Междунар. конф. – Барнаул, 2000. – С. 27–29.
2. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П. Некоторые особенности радиоактивного загрязнения территории Горного Алтая // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во «Тандем-Арт», 2004. – С. 769–771.
3. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Робертус Ю.В. Оценка выпадения делящихся радионуклидов на территории Республики Алтай методом осколочной радиографии годовых колец деревьев // Тяжёлые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Сб. докл. II Междунар. научно-практ. конф. – Семипалатинск, 2002. – С. 496–501.
4. Рихванов Л.П., Робертус Ю.В., Таловская А.В., Любимов Р.В., Шатилов А.Ю. Особенности распределения химических элементов в талой воде ледника Большой Актру (Горный Ал-

- тай) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 97–103.
5. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. и др. Исследование изменения геохимических свойств биосферы с использованием последовательно образующихся природных образований // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды: Матер. Всеросс. конф. – Иркутск: ИГ СО РАН, 2007. – С. 223–228.
6. Кац В.Е. Распределение таллия в компонентах окружающей среды Республики Алтай // Экология и охрана окружающей среды: Тез. докл. IV Всеросс. научно-практ. конф. – Рязань, 1994. – С. 139–141.
7. Фахрутдинов Р.Ф. Содержание некоторых тяжелых металлов (Pb, Cu, Cd, Hg) в некоторых водно-ледниковых объектах высокогорья Алтая // Фундаментальные проблемы охраны природно-территориальных комплексов Западной Сибири / под ред. И.В. Барышникова. – Горно-Алтайск: Изд-во ГАГУ, 2000. – С. 75–80.

Поступила 11.05.2010 г.