

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЭКОЛОГИЯ

1

ЯНВАРЬ—ФЕВРАЛЬ

1988



Издательство «Наука»



УДК 591.5 : 546.49

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЕЛИЧИНУ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ В ГИДРОБИОНТАХ ПРЭСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

А. М. Никаноров, А. В. Жулидов, Н. А. Дубова

Выделены три группы факторов, определяющие уровни содержания ртути у пресноводных организмов: концентрация металла в природных средах (пище), возрастные и половые особенности аккумуляции ртути. Видовые отличия в уровнях содержания металла в теле беспозвоночных животных и растений изученных видов незначительны и нестабильны. Характер (тип) питания пресноводных беспозвоночных животных практически не влияет на величину содержания ртути в их теле.

Одним из центральных вопросов в исследованиях по биомониторингу ртути в пресноводных экосистемах является изучение экологических факторов, определяющих уровень содержания металла в живых организмах. Актуальность этой проблемы определяется не только высокой токсичностью ртути и ростом ее содержания в биосфере, но и предпринятыми в последнее время попытками подойти к разработке общей теории буферной емкости пресноводных экосистем (Израэль и др., 1985; Никаноров и др., 1985). Однако поведение ртути в пресноводных экосистемах изучено слабо, а получаемые результаты часто противоречивы. В значительной мере это связано с аналитическими трудностями определения ртути в природных объектах и недостаточной изученностью факторов, влияющих на поведение металла в пресноводных экосистемах.

Настоящая работа посвящена анализу основных экологических факторов, непосредственно влияющих на величину содержания ртути в гидробионтах, главным образом в пресноводных беспозвоночных.

Для того чтобы проследить, существуют ли видовые и географические особенности аккумуляции ртути пресноводными организмами, в 1974—1984 гг. целенаправленно собирали гидробионтов из разных географических пунктов (видовые названия организмов и места их сборов приведены в табл. 1). Поскольку собранный материал не дает возможности однозначно интерпретировать получаемые результаты, а поставленная цель требует детальных исследований в модельных экосистемах, авторы в течение 1977—1981 и 1983—1984 гг. осуществляли работы на территории Воронежского биосферного заповедника. Причины выбора данного заповедника, а также геоботаническая характеристика участков, на которых собирали материал, описаны ранее (Ни-

каноров, Жулидов, 1984; Никаноров и др., 1985). Анализ ртути осуществляли¹ беспламенным атомно-абсорбционным методом (Никаноров и др., 1985).

В табл. 1 приведены средние значения содержания ртути в теле особей различных видов пресноводных организмов. Сравнительный анализ этого материала, а также данных зарубежных специалистов (Lodenius, 1980; Suckcharoen, 1980; Moore, Ramamoorthy, 1984 и др.) позволяет заключить, что хотя животные в среднем содержат более высокие уровни изучаемого металла, чем растения, тем не менее между ними не выявлены стабильные отличия. Видовые различия в уровнях содержания металла в теле изученных беспозвоночных также незначительны и нестабильны; более значимы географические отличия (табл. 1, см. также работу Ф. Я. Комаровского, Л. Р. Полищука, 1981).

Однако в настоящее время не представляется возможным однозначно ответить, существует ли истинная географическая изменчивость данного показателя (определяемая природными физико-географическими и геохимическими особенностями регионов) или обнаруженные различия объясняются региональными особенностями содержания металла в пище и окружающей среде, связанными с антропогенной деятельностью. Последняя версия более вероятна. Для решения этого вопроса важно было сравнить данные, характеризующие уровни содержания ртути в гидробионтах, собранных в различных регионах в историческом прошлом, когда в целом поступление ртути в пресноводные экосистемы за счет антропогенной деятельности было менее существенным (табл. 2). Несмотря на незначительный объем материала, тем не менее можно утверждать, что обнаруженные географические различия в уровнях содержания ртути в гидробионтах в основном обусловлены региональными

Таблица 1
Видовая и географическая изменчивость содержания ртути (мг/кг сухого веса) в гидробионтах водотоков и водоемов (1974—1984 гг.)

Вид	Место сбора	Число проб	Содержание ртути
Растения			
Algae <i>Cladophora glomerata</i> Kütz.	Архангельская обл.	10	0,12±0,01
	Ростовская обл.	10	0,22±0,02
Anthophyta, Lemnaceae <i>Lemna trisulca</i> L.	Воронежская обл.	29	0,31±0,05
	Большеземельская тундра	12	0,06±0,01
Животные			
Plasmodroma <i>Ameba proteus</i> (Pall.) Leidy	Воронежский заповедник	1	0,15
Spongia <i>Spongilla lacustris</i> L.	Воронежская обл.	21	0,24±0,05
Mollusca <i>Sphaerium corneum</i> (L.) 10—14 мм	Большеземельская тундра	8	0,05±0,01
	Воронежский заповедник	13	0,17±0,02
	Ростовская обл.	24	0,22±0,02

¹ Авторы благодарят М. Лодениуса (Department of Environmental Conservation University of Helsinki, Finland) за анализ ртути в контрольных образцах беспозвоночных.

Вид	Место сбора	Число проб	Содержание ртути
<i>Sph. corneum</i> (8—12 мм)	Верхний Енисей	11	0,12±0,01
<i>Lytnaea auricularia</i> (L.)	Большеземельская тундра	10	0,10±0,01
	Ростовская обл.	11	0,81±0,10
<i>L. lagotils</i> (Schranck)	Воронежская обл.	18	0,35±0,02
<i>L. ovata</i> (Drap.)	»	15	0,29±0,02
	Ростовская обл.	14	0,57±0,08
<i>Bithinia tentaculata</i> (L.)	Воронежский заповедник	13	0,18±0,02
Annelidae, Hirudinea			
<i>Haemopsis sanguisuga</i> (L.)	»	24	0,28±0,01
<i>Erpobdella lineata</i> (O. F. Müll.)	»	29	0,26±0,02
Oligochaeta			
<i>Peloscoclex ferox</i> (Eisen) (20—28 мм)	Большеземельская тундра	9	0,16±0,01
<i>Limnodrilus udekemianus</i> Clapar. (30—45 мм)	»	9	0,16±0,01
<i>L. udekemianus</i> (30—55 мм)	Воронежская обл.	10	0,25±0,02
Arthropoda, Crustacea			
<i>Daphnia pulex</i> De Geer, яйценозные самки	Архангельская обл.	12	0,08±0,01
	Ростовская обл.	10	0,58±0,05
<i>Asellus aquaticus</i> L., яйценозные самки (5,3—9,2 мм)	Воронежский заповедник	19	0,08±0,01
<i>Gammarus pulex</i> (L.), самцы	Воронежская обл.	35	0,17±0,02
<i>G. pulex</i> , самки	»	29	0,20±0,01
Chelicerata, Arachnida			
<i>Dolomedes fimbriatus</i> (Cler.), самки	Воронежский заповедник	18	0,09±0,01
<i>D. fimbriatus</i> , самцы	Воронежская обл.	10	0,24±0,02
Insecta, Ephemeroptera			
<i>Cloen dipterum</i> (L.), личинки	Вологодская обл.	11	0,15±0,01
	Воронежская обл.	13	0,18±0,02
Odonata, личинки старших возрастов			
<i>Sympetrum sanguineum</i> (O. F. Müll.)	»	13	0,20±0,01
<i>S. flaveolum</i> (L.)	»	12	0,15±0,01
<i>S. vulgatum</i> (L.)	»	11	0,19±0,01
<i>Lestes sponsa</i> (Haus.)	»	10	0,18±0,01
<i>Libellula depressa</i> L.	»	12	0,10±0,01
<i>L. depressa</i>	Донецкая обл.	9	0,42±0,02
Plecoptera, личинки старших возрастов			
<i>Nemoura cinerea</i> Retz.	Вологодская обл.	10	0,09±0,01
	Ростовская обл.	11	0,31±0,02
Heteroptera, имаго, самцы			
<i>Ilyocoris cimicoides</i> (L.)	Вологодская обл.	11	0,28±0,01
	Ростовская обл.	18	0,51±0,03
<i>Nepa cinerea</i> L.	Вологодская обл.	10	0,19±0,01
	Донецкая обл.	13	1,15±0,07
Coleoptera, имаго, самцы			
<i>Dytiscus marginalis</i> L.	Архангельская обл.	11	0,15±0,01
	Харьковская обл.	11	1,02±0,08
<i>D. lapponicus</i> Gyll.	Большеземельская тундра	8	0,15±0,01
	Коми АССР	12	0,08±0,01
<i>Hydrous piceus</i> (L.)	Воронежская обл.	12	0,13±0,01
	Ростовская обл.	12	0,55±0,02

ми различиями в величине антропогенного воздействия на пресноводные экосистемы.

Специально проведенные исследования показали, что между уровнем ртути в гидробионтах и в донных отложениях пресноводных экосистем в большинстве случаев существует положительная корреляционная связь, и именно величина содержания металла в пище и окружаю-

Таблица 2

Уровни содержания ртути (мг/кг сухого веса) в старых сборах растений и коллекционных образцах пресноводных беспозвоночных животных

Название организмов	Место сбора	Время сбора, годы	Число проб	Содержание ртути	
				lim	M
Растения, листья					
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	Река Усмань, Воронежская обл.	1913—1939	2	0,03—0,04	0,04
	Коми АССР	1938—1940	4	0,02—0,07	0,05
Животные					
<i>Lymnaea stagnalis</i> (L.), длина раковины 21—30 мм	Воронежский заповедник	1938—1939	5	0,04—0,07	0,05
<i>L. ovata</i> (Drap.)	Большеземельская тундра	1903—1904	4	0,02—0,07	0,05
<i>Ptyocoris cimicoides</i> (L.), имаго	Воронежский заповедник	1932—1939	8	0,07—0,29	0,15
<i>Notonecta glauca</i> L., имаго	Ростовская обл.	1940	7	0,08—0,30	0,14
	Воронежский заповедник	1940	3	0,07—0,13	0,09
<i>Dytiscus marginalis</i> L., имаго, самцы	»	1938—1940	5	0,03—0,10	0,05
	Хоперский заповедник	1940	3	0,03—0,05	0,04
	Окский заповедник	1937—1939	8	0,03—0,09	0,05
<i>D. marginalis</i> , имаго, самки	»	1937—1939	3	0,03—0,07	0,04
<i>D. marginalis</i> , самцы	Ростовская обл.	1940	5	0,03—0,08	0,05
<i>D. marginalis</i> , самки	»	1940	3	0,03—0,08	0,04
<i>Hydrous piceus</i> L., самцы	Воронежская обл.	1952	7	0,03—0,09	0,06
	Ростовская обл.	1950	6	0,04—0,11	0,08

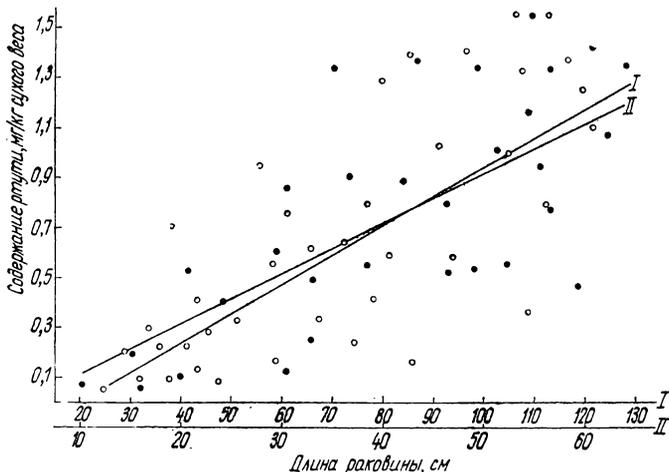
щих средах определяет уровень ртути в гидробионтах (Никаноров и др., 1982, 1985; Никаноров, Жулидов, 1984; Sheffy, 1978; Biesinger et al., 1982; Balogh, Salánki, 1984; Moore, Ramamoorthy, 1984 и др.). Необходимо, однако, отметить, что характер (тип) питания пресноводных беспозвоночных практически не влияет на величину содержания металла в теле (см. табл. 1 и 2, а также Никаноров и др., 1985; Cushing, 1979), и лишь рыбы-хищники накапливают более высокие концентрации ртути, чем растительноядные виды (Hejtmanek et al., 1980; Phillips et al., 1980).

Тот факт, что местонахождение пресноводных беспозвоночных в трофической сети практически не влияет на величину содержания в их теле ртути, парадоксален с точки зрения парадигмы, сложившейся в экологии: чем выше положение животного в трофической пирамиде, тем сильнее проявляется у них способность к аккумуляции различного рода поллютантов.

Анализ факторов, определяющих уровни ртути в гидробионтах, выявил возрастную изменчивость содержания металла в теле многих видов животных. У рыб, например, содержание металла в теле растет пропорционально размерам (весу) животных (Bache et al., 1971; Fa-

gerstom et al., 1974; Scott, 1974; Potter et al., 1975; Nuorteva et al., 1979; Phillips et al., 1980 и др.). Сходное явление (зависимость) наблюдается и у моллюсков (см. рисунок): чем крупнее раковина, тем более высокие концентрации ртути характерны для тела моллюска. У насекомых зависимость между уровнем ртути в теле и возрастом животного более сложная — концентрация металла в теле увеличивается в процессе роста личинок и уменьшается у свежевывупившихся имаго (табл. 3, см. также Nuorteva et al., 1980; Nuorteva P., Nuorteva S.-L., 1982). Причем эта зависимость сохраняется у Dytiscidae при различных уровнях ртути в природной среде.

Необходимо отметить, что возрастную изменчивость содержания ртути трудно оценить без учета того факта, что животные регулируют



Зависимость между содержанием ртути в теле *Anodonta cygnea* L. (I) и *Lymnaea stagnalis* L. (II) и размерами раковины моллюсков (при уровне ртути в грубодетритном иле соответственно 0,10—0,18 и 0,10—0,20 мг/кг сухого веса). Воронежский биосферный заповедник, река Усмань, 1983 г.:

○ — *A. cygnea*: $y = -0,272 + 0,012x$; ● — *L. stagnalis*: $y = -0,125 + 0,021x$, где y — содержание ртути в теле моллюсков, x — длина раковины.

уровень металла в теле. Именно регуляцией металла в теле в процессе метаморфоза личинок в имаго объясняется описанное выше поведение ртути в теле насекомых в процессе их онтогенеза. Подобный механизм регуляции некоторых тяжелых металлов детально изучен у наземных насекомых (Емец, Жулидов, 1982; Nuorteva P., Nuorteva S.-L., 1982). У пресноводных беспозвоночных ртуть выводится из организма в течение всей жизни; биологический период полувыведения данного металла из организма беспозвоночных исчисляется сутками и лишь изредка достигает месяца (Никаноров и др., 1985).

Ранее проведенные исследования показали, что у Dytiscidae существуют половые отличия в аккумуляции некоторых тяжелых металлов (Жулидов, Емец, 1981). Дополнительные исследования показали, что у Dytiscidae в фоновых (относительно незагрязненных) экосистемах (р. Ивница, Воронежский заповедник) половые отличия в аккумуляции ртути практически отсутствуют, однако с ростом содержания металла в донных отложениях самцы (за исключением свежевывупившихся) накапливают достоверно более высокие уровни ртути, чем самки (см. табл. 3). Данное явление, помимо чисто познавательного интереса, важно для практики биомониторинга ртути.

Таблица 3

Возрастная и половая изменчивость содержания ртути в теле *Dytiscidae* при различных уровнях металла в грубодетритном иле (Воронежский биосферный заповедник, реки Ивница, и Усмань, 1977—1981 и 1983—1984 гг.), мг/кг сухого веса

Анализируемый объект	Река Ивница		Река Усмань	
	Число проб	Содержание ртути	Число проб	Содержание ртути
Грубодетритный ил	34	0,07±0,01	51	0,28±0,03
<i>Acilius canaliculatus</i> Nic.:				
личинки 1-го возраста	38	0,27±0,02	42	0,25±0,02
личинки 2-го возраста	43	0,39±0,02	44	0,69±0,04
личинки 3-го возраста	68	0,61±0,03	83	1,31±0,12
свежевылупившиеся имаго:				
самцы	13	0,20±0,03	23	0,37±0,04
самки	16	0,22±0,01	20	0,35±0,01
имаго:				
самцы	45	0,31±0,05	73	0,65±0,08
самки	51	0,30±0,01	85	0,39±0,01
<i>Dytiscus marginalis</i> L.				
личинки 1-го возраста	42	0,28±0,01	38	0,31±0,02
личинки 2-го возраста	38	0,42±0,02	32	0,93±0,06
личинки 3-го возраста	51	0,79±0,04	61	1,65±0,14
свежевылупившиеся имаго:				
самцы	9	0,25±0,03	12	0,30±0,02
самки	10	0,21±0,01	11	0,27±0,01
имаго:				
самцы	37	0,38±0,04	25	0,92±0,09
самки	31	0,34±0,01	28	0,53±0,01

Половые отличия в аккумуляции ртути у *Dytiscidae* наблюдаются и при анализе отдельных частей и органов животных (табл. 4). Так, у

Таблица 4

Особенности распределения ртути по частям тела и органам *Dytiscus marginalis* L. из реки Усмань в Воронежском биосферном заповеднике (при уровне ртути в грубодетритном иле 0,10—0,24 мг/кг сухого веса, 1983 г.), мг/кг сухого веса

Часть тела, орган	Пол, стадия развития	Число проб	Содержание ртути
Голова	Самцы, имаго	21	0,09±0,01
	Самки, имаго	22	0,08±0,01
	Личинки 3-го возраста	25	0,10±0,01
Грудь	Самцы, имаго	39	0,13±0,01
	Самки, имаго	49	0,14±0,01
	Личинки 3-го возраста	64	0,16±0,02
Брюшко	Самцы, имаго	39	0,16±0,02
	Самки, имаго	49	0,23±0,01
	Личинки 3-го возраста	53	0,31±0,04
Жировое тело (висцеральные и париетальные слои)	Самцы, имаго	14	0,39±0,04
	Самки, имаго	12	0,73±0,05
Кишечник, передний отдел	Личинки 3-го возраста	17	0,21±0,01
	Самцы, имаго	10	0,18±0,02
Кишечник, средний отдел	Самки, имаго	11	0,11±0,01
	Самцы, имаго	13	0,28±0,02
Кишечник, задний отдел	Самки, имаго	14	0,21±0,01
	Личинки 3-го возраста	10	0,31±0,02
	Самцы, имаго	13	0,28±0,01
	Самки, имаго	14	0,18±0,01
Яичник	Личинки 3-го возраста	12	0,32±0,01
	Самки, имаго	23	0,07±0,01

имаго *Dytiscus marginalis* максимальные количества изучаемого металла накапливаются в жировом теле (а у личинок — в среднем и заднем отделах кишечника). При этом у самок содержание ртути в жировом теле и брюшке более высокое, а во всех отделах кишечника более низкое, чем у самцов. Уровни металла в голове и груди у самцов и самок не отличаются. В экспериментальных исследованиях на мухах показано, что у имаго максимальные количества ртути аккумулируются в среднем и заднем отделах кишечника и несколько меньше — в брюшно-полостном жире, а самые низкие концентрации отмечены в переднем отделе кишечника, летательных мускулах и крыльях (Nuorteva P., Nuorteva S.-L., 1982).

Таким образом, анализ материала позволяет выделить три группы факторов, определяющих величину содержания ртути в гидробионтах (беспозвоночных): уровень содержания металла в окружающей среде (пище), возрастные и половые особенности аккумуляции ртути.

Гидрохимический институт
Ростов-на-Дону

Поступила в редакцию
30 января 1986 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Емец В. М., Жулидов А. В. Содержание микроэлементов у колорадского жука на разных стадиях онтогенеза при различном содержании металлов в кормовом растении. — ДАН СССР, 1982, 262, № 3, с. 743—745.
- Жулидов А. В., Емец В. М. О половых различиях в накоплении тяжелых металлов у водных жуков. — Журнал общ. биол., 1981, 42, № 4, с. 1018—1020.
- Израэль Ю. А., Никаноров А. М., Лапин И. А. и др. Оценка буферной емкости малых водотоков к тяжелым металлам. — ДАН СССР, 1985, 283, № 3, с. 703—706.
- Комаровский Ф. Я., Полищук Л. Р. Ртуть и другие тяжелые металлы в водной среде: миграция, накопление, токсичность для гидробионтов. — Гидробиол. журнал, 1981, 17, № 5, с. 71—83.
- Никаноров А. М., Жулидов А. В. Подходы к биомониторингу тяжелых металлов на начальных этапах их поступления в реки (на примере ртути). — Гидрохимические материалы, 1984, 92, с. 106—118.
- Никаноров А. М., Жулидов А. В., Емец В. М. Биомониторинг свинца в пресноводных экосистемах Воронежского заповедника. — Изв. АН СССР, сер. биол., 1983, № 6, с. 897—905.
- Никаноров А. М., Жулидов А. В., Емец В. М. и др. Особенности сопряженного накопления ртути в теле водных беспозвоночных и донных отложениях на начальной стадии аккумуляции металла в речных экосистемах. — ДАН СССР, 1982, 264, № 4, с. 1022—1024.
- Никаноров А. М., Жулидов А. В., Покаржевский А. Д. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. — Л.: Гидрометеонздат, 1985. — 149 с.
- Bache C. A., Gutenmann W. H., Lisk D. V. Residues of total mercury and methylmercury salts in lake trout as a function of age. — Science, 1971, N 172, p. 951—952.
- Balogh K. V., Salánki J. The dynamics of mercury and cadmium uptake into different organs of *Anodonta cygnea* L. — Water Res., 1984, 18, N 11, p. 1381—1387.
- Biesinger K. E., Anderson L. E., Eaton J. G. Chronic effects of inorganic and organic mercury on *Daphnia magna*: toxicity, accumulation, and loss. — Arch. Environm. Contam. Toxicol., 1982, 11, N 6, p. 769—774.
- Cushing C. E. Trace elements in a *Columbia river* food web. — Northwest Sci., 1979, 53, N 2, p. 118—125.
- Fagerstom T., Asell B., Jernelov A. Model for accumulation of methylmercury in northern pike (*Esox lucius*). — Oikos, 1974, N 25, p. 14—25.
- Hejtmánek M., Svobodova Z., Vostradovsky J. Fische als Indicator der Quecksilberskontamination in Wässern. — In: Proc. 3 Int. Conf. Bioindic. Deteriorations. Reg., Liblice, 1977. Praha, 1980, p. 275—282.
- Lodenius M. Aquatic plants and littoral sediments as indicators of mercury pollution in some areas in Finland. — Ann. Bot. Fennici, 1980, 17, p. 336—340.
- Moore J. W., Ramamoorthy S. Heavy Metals in Natural Waters Applied Monitoring and Impact Assessment. — N. Y.: Springer-Verlag, 1984. — 268 p.
- Nuorteva P., Nuorteva S.-L. The Fate of Mercury in Sarcosaprophagous Flies and in Insects Eating Them. — AMBIO, 1982, 11, N 1, p. 34—37.
- Nuorteva P., Häsänen E., Nuorteva S.-L. Bioaccumulation of mercury in sarcosaprophagous insects. — Norw. L. Entomol., 1978, 25, N 1, p. 79—80.

- Nuorteva P., Lodenius M., Nuorteva S.-L. Decrease in the mercury levels of *Esox lucius* (L.) and *Abramis farenus* (L.) (Teleostei) in the Hämeenkyrö watercourse after the phenylmercury ban in Finland. — *Aquilo Ser. Zool.*, 1979, 19, p. 97—100.
- Nuorteva P., Nuorteva S.-L., Suckcharoen S. Bioaccumulation of Mercury in Blowflies Collected near the Mercury Mine of Idrija, Yugoslavia. — *Bull. Environm. Contam. Toxicol.*, 1980, 24, p. 515—521.
- Phillips G. R., Lenhart T. E., Gregory R. W. Relation between Trophic Position and Mercury Accumulation among fishes from the Tongue River Reservoir, Montana. — *Environ. Research.*, 1980, 22, N 1, p. 73—80.
- Potter L., Kidd D., Standiford D. Mercury levels in Lake Powell; bioamplification of mercury in a man-made desert reservoir. — *Environm. Sci. Technol.*, 1975, N 9, p. 41—46.
- Scott D. P. Mercury concentration in white muscle in relation to age, growth, and condition in four species of fishes from Clay Lake, Ontario. — *J. Fish Res. Bd. Canada*, 1974, N 31, p. 1723—1729.
- Sheffy T. B. Mercury burdens in crayfish from the Wisconsin river. — *Environm. Pollut.*, 1978, 17, N 3, p. 219—236
- Suckcharoen S. Mercury Contamination of Terrestrial Vegetation near a Caustic Soda Factory in Thailand. — *Bull. Environm. Contam. Toxicol.*, 1980, 24, p. 463—466.
-