

ГЕНОТОКСИЧНОСТЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ р. ДОН (2001–2007 гг.)

© 2012 г. М. А. Сазыкина, В. А. Чистяков, И. С. Сазыкин

Научно-исследовательский институт биологии

Южного федерального университета

344090 Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194/1

Поступила в редакцию 10.08.2010 г.

Приведены данные по генотоксичности донных отложений р. Дон за 2001–2007 гг. Выявлены районы Нижнего Дона, для которых характерно хроническое загрязнение генотоксинами. Обсуждены возможные источники их поступления.

Ключевые слова: генотоксичность, биосенсор, биолюминесценция, донные отложения, биотестирование, загрязнение.

Крупнейшая река Европейской части России Дон в своем нижнем течении – источник питьевой воды для населения Ростовской обл., численность которого более 4 млн. чел. Кроме того, Дон и его притоки относятся к водным объектам, имеющим большое значение для воспроизводства и использования водных биоресурсов. Экосистема Нижнего Дона подвержена интенсивному антропогенному прессингу – в нее попадает широкий спектр загрязняющих веществ. Сточные воды крупных предприятий машиностроительной, пищевой, химической и других отраслей промышленности, хозяйственно-бытовые сточные воды, смывы с сельскохозяйственных угодий, сбросы животноводческих комплексов, шахтные воды и подсланевые воды речных судов вносят свой вклад в загрязнение. Загрязнению подвергаются районы забора водопроводной воды, места обитания многих рыб, имеющих промысловую ценность (в частности, уникальных азовских популяций осетровых), а также прибрежная зона, имеющая рекреационное значение.

Одно из наиболее опасных последствий антропогенного прессинга – загрязнение водных экосистем генотоксинами. Проводимые в последние десятилетия исследования показали, что действие этих веществ проявляется в виде физиологических нарушений, тератогенеза, иммунодепрессии у основных промысловых гидробионтов Азово-Донского бассейна [5, 7].

Для эффективной борьбы с этими негативными явлениями необходима информация о характере загрязнения. Для объективной оценки загрязнения и, особенно, его последствий необходимо сопоставле-

ние данных химического анализа поллютантов и биотестов, описывающих токсикологические эффекты всего комплекса веществ, присутствующих в изучаемых образцах [32, 34, 38, 39]. Результаты работ по определению в компонентах экосистемы Нижнего Дона приоритетных токсикантов многократно публиковались и хорошо известны специалистам [1–3, 19–24]. В то же время, данные биотестирования описаны достаточно фрагментарно в небольшом числе публикаций [4, 6, 12, 18].

Для тестирования токсичности водной среды широко применяются биосенсоры – системы, в которых изменения живого объекта регистрируются в режиме “on line” при помощи электронного устройства [26, 28, 31, 33, 35]. Для контроля генотоксичности широко применяются биосенсоры на основе светящихся бактерий [27, 29, 30, 36, 37].

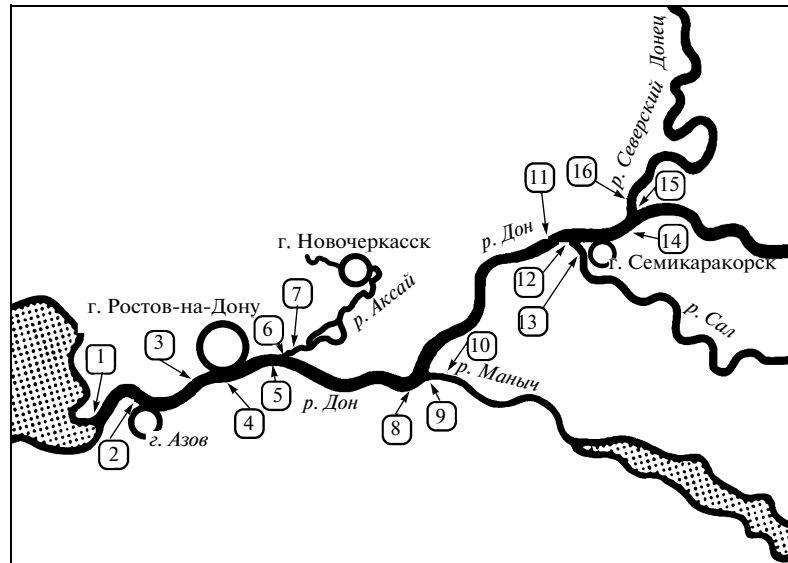
Задачей данной работы было изучение генотоксичности донных отложений (ДО) Нижнего Дона в 2001–2007 гг. при помощи специальной биолюминесцентной тест-системы, позволяющей достичь оптимального сочетания экспрессности, чувствительности и трудоемкости [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом проведенных исследований служили образцы ДО, отобранные в нижнем течении р. Дон в 2001–2007 гг. ДО отбирали на 16 участках р. Дон – от 500 м выше устья р. Северский Донец до 0 км (створ) (рисунок) с помощью дночерпателя Петерсена. По 100 г каждой пробы упаковывали в химически чистую посуду и доставляли в лабораторию. В качестве экстрагента использовали 1%-ный раствор TWEEN-80 в 96%-ном этаноле.

Для экстракции 20 г ДО помещали в коническую колбу Эрленмейера с притертой крышкой, добав-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (проект 2.1.1/5028 по аналитической ведомственной целевой программе “Развитие научного потенциала высшей школы” 2009–2010 гг.).



Места отбора образцов ДО в нижнем течении р. Дон в 2001–2007 гг. 1 – 0 км (створ), 2 – 500 м ниже г. Азов, 3 – 500 м ниже канализации г. Ростова-на-Дону, 4 – 500 м ниже устья р. Темерник, 5 – 500 м ниже устья р. Аксай, 6 – устье р. Аксай, 7 – 500 м выше устья р. Аксай, 8 – 500 м ниже устья р. Маныч, 9 – устье р. Маныч, 10 – 500 м выше устья р. Маныч, 11 – 500 м ниже устья р. Сал, 12 – устье р. Сал, 13 – 500 м выше устья р. Сал, 14 – 500 м ниже устья р. Северский Донец, 15 – устье р. Северский Донец, 16 – 500 м выше устья р. Северский Донец.

ляли 20 мл экстрагента и экстрагировали в течение 60 мин на круговой качалке УВМТ-12-250 при 69 об/мин и комнатной температуре. Затем экстракты фильтровали через обеззоленный бумажный фильтр “синяя лента”, 50 мкл экстракта использовали для тестирования генотоксичности ДО.

В качестве тест-системы была использована модификация SOS-lux теста [15]. Репортером SOS-ответа служил lux-оперон (штамм *E. coli* С600, трансформированный плазмидой рPLS-1, в которой оперон биоломинесценции находится под контролем SOS-промотора – С600(рPLS-1) [11]. Для контроля эффектов, не связанных с SOS-индукцией, использовали штамм *E. coli* С600(рВА-5), lux-оперон которого находится под контролем конститутивного промотора.

Штаммы *E. coli* выращивали на среде LB (пептон – 10 г, дрожжевой экстракт – 5 г, хлористый натрий – 10 г на 1 л раствора; рН – 7.0) в присутствии 50 мкг/мл ампициллина. В 50 мл среды вносили 0.1 мл ночной культуры *E. coli* и инкубировали в термостате в течение часа при 37°C. Затем добавляли среду LB до достижения оптической плотности культуры 0.1 (550 нм). Аликвоты этой культуры по 1 мл переносили в стерильные пробирки и добавляли в них изучаемый экстракт в объеме 50 мкл. В вариантах с метаболической активацией в пробирки добавляли по 25 мкл активирующей смеси, содержащей фракцию микросомных ферментов печени крыс S-9 (таблица) [9]. Содержимое пробирок тщательно перемешивали. Пробирки помещали в термостат на час при температуре 37°C. В процессе инкубации пробирки несколько раз встряхивали.

По окончании инкубации культуры охлаждали до комнатной температуры в течение 10 мин. Измерение интенсивности биоломинесценции культур, содержащих анализируемые соединения, а также контрольных культур, проводили на люминометре ЛТ-01 (Россия).

Мерой генотоксичности служил фактор индукции I' – отношение интенсивности свечения суспензии SOS-lux штамма, содержащей тестируемое соединение, L_c к интенсивности свечения контрольной суспензии SOS-lux штамма L_k

$$I' = L_c/L_k.$$

Коэффициент подавления свечения K рассчитывали по формуле

$$K = l_c/l_k,$$

где l_c – интенсивность свечения суспензии lux-штамма в присутствии тестируемого соединения; l_k – интенсивность свечения контрольной суспензии.

Истинные значения фактора индукции рассчитывали по формуле

$$I' = I/K.$$

Достоверность отличия биоломинесценции в опыте от контрольной величины оценивали по t -критерию [8]. Вывод о генотоксичности пробы ДО формулировали при $p < 0.05$. Если при достоверном отличии опыта от контроля значения фактора индукции составляли < 2 , обнаруженный генотоксический эффект оценивали как слабый; если они лежа-

ли в диапазоне от 2 до 10 – как средний, а при превышении 10 – как сильный.

Все эксперименты проводили в трех–пяти независимых повторностях.

Для образцов ДО со статистически значимыми генотоксическими эффектами рассчитывали эквивалентную (вызывающую аналогичный генотоксический эффект в использованной тест-системе) концентрацию бенз(а)пирена, мкг/л (таблица).

Для ее определения находили зависимость генотоксического эффекта этого вещества от концентрации. Эксперименты проводили в условиях метаболической активации. Для построения градуировочного графика использовали диапазон концентраций бенз(а)пирена от 10 до 30 мкг/л. Концентрацию бенз(а)пирена, способную вызвать эффект, эквивалентный наблюдаемому при тестировании природных образцов, рассчитывали по градуировочному графику.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2001 г. Среди проб, отобранных в апреле 2001 г., генотоксичными были только две (1, 9), отобранные в устьях рек Дон и Маныч (таблица).

Генотоксичность ДО в районе впадения р. Маныч в р. Дон может быть связана с пестицидным загрязнением, интенсивный источник которого – выращивание риса [25] в бассейне этой реки [17].

Очень низкие значения фактора индукции, зафиксированные в 2001 г. (как в апреле, так и в октябре) в 500 м ниже устья р. Темерник, могут свидетельствовать о присутствии в ДО токсичных веществ. Стоит отметить, что весной 2000 г. в районе впадения р. Темерник в р. Дон было зарегистрировано аномально высокое содержание хлорорганических пестицидов (ХОП) – 13 ПДК [16, 17]. Вместе с постоянно регистрируемыми пестицидами групп ГХЦГ и ДДТ в воде р. Дон в 2000 г. обнаружены 11 применяющихся пестицидов [2].

В октябре 2001 г. генотоксичные пробы 1–3 зафиксированы в дельте р. Дон, 8, 9 – в устье и ниже по течению р. Маныч (таблица). Генотоксичность ДО в районах отбора проб 1 и 9 фиксировалась и в апреле 2001 г.

2002 г. Весной 2002 г. наблюдалась аналогичная картина (таблица) – генотоксичность ДО регистрируется в пяти пробах, отобранных практически в тех же районах [12]. По результатам изучения р. Дон в 2002 г. [19] ситуация по загрязнению вод осталась такой же, как в 2001 г., а основными загрязняющими веществами были нефтяные углеводороды, соединения меди и железа, сульфаты, органические соединения, фенолы, ртуть.

2003 г. В мае и июле 2003 г. генотоксичность ДО обнаружена практически на всей акватории Нижнего Дона, за исключением одного района, исследованного в мае, и трех районов, исследованных в июле.

Из данных, представленных в таблице, видно, что генетическая активность отобранных в мае 2003 г. ДО р. Дон выявляется в случае применения метаболической активации. Без применения метаболической активации генотоксичность ДО обнаружена лишь в районах 15 и 16.

Для проб, отобранных в июле 2003 г., характерна картина, идентичная полученной в мае. В большинстве случаев генетическая активность проб ДО выявляется для случаев тестирования с использованием метаболической активации. Но ее значения несколько меньше по сравнению со значениями, полученными для майских проб. Без применения метаболической активации генотоксичность ДО обнаружена в районах отбора проб 6 и 16 (устье р. Аксай и 500 м выше устья р. Северский Донец соответственно).

Выявленная генотоксичность ДО, в частности, вызываемая веществами промутагенной природы, может быть обусловлена активным судоходством – главным источником полиароматических углеводородов, а также промышленными и бытовыми стоками городов в бассейне р. Дон.

Устье р. Маныч, а также районы в 500 м ниже и 500 м выше устья р. Маныч – районы с постоянно повышенной токсикологической нагрузкой (генетическая активность в них регистрировалась и ранее, в 2001–2002 гг.).

По данным 2003 г. к выявленным ранее наиболее загрязненным добавились районы устьев рек Северский Донец и Аксай (генотоксичность ДО здесь выявляется как без метаболической активации, так и с ее использованием) [14].

Реки Северский Донец и Маныч – основные притоки Дона, оба судоходны. Известно, что в местах транспортировки нефтепродуктов происходят их систематические потери, аварийные проливы и, как следствие, загрязнение грунтов и вод. Содержание нефтепродуктов – критический показатель загрязненности вод и ДО.

В 2003 г. среднегодовые концентрации нефтепродуктов в воде и ДО Нижнего Дона многократно превышали ПДК (0.5 мг/л), установленные для рыбохозяйственных водоемов [10]. Аномально высокое нефтяное загрязнение ДО (5.3 г/(кг сух. массы)) было зафиксировано в районе устья р. Аксай. Наиболее вероятный источник последнего – ремонтная база судов, расположенная выше по течению р. Аксай, где отстаиваются и ремонтируются морские и речные суда [20].

2004 г. Из данных таблицы видно, что в июне 2004 г., как и в 2003 г., генотоксичность ДО зарегистрирована практически в каждом исследованном районе, причем самые высокие значения фактора индукции отмечались в районах 500 м выше устья

р. Северский Донец (2.1), 500 м ниже устья р. Аксай (3.2) и 500 м ниже устья р. Маныч (3.4).

В районе р. Маныч в 2004 г. были зарегистрированы наиболее высокие концентрации полихлорированных бифенилов (ПХБ). В устье же р. Аксай максимальное загрязнение ПХБ в воде варьировало в пределах 0.9–34.0 нг/л. Генотоксичность ДО в устье р. Аксай можно объяснить также и высокими концентрациями нефтепродуктов (1.2 г/кг) [21].

В устье р. Северский Донец в 2004 г. загрязнение ДО нефтепродуктами составило 1.57 г/кг, а также наблюдалось и максимальное накопление ХОП – 13 мкг/(кг сух. массы). Установлено, что оно было вызвано препаратом, содержащим ДДТ [21].

2005 г. Данные по генотоксичности ДО, полученные в 2005 г. (таблица), показали некоторое уменьшение ее величины. Следует отметить, что в 2005 г. среднее загрязнение как воды, так и ДО в Нижнем Дону было одним из самых слабых за последние несколько лет [22, 23]. В частности, было зарегистрировано наиболее слабое за последние несколько лет загрязнение воды Нижнего Дона стойкими ХОП, обусловленное значительным уменьшением количеств применяемых в регионе пестицидов, в том числе в рисоводстве.

К наиболее загрязненным районам в этот период, по данным авторов статьи, относятся следующие: в 500 м выше устья р. Аксай (в устье р. Аксай в пробах ДО зафиксирована токсичность), 500 м ниже и 500 м выше устья р. Маныч, а также в 500 м ниже устья р. Северский Донец. Наиболее высокий уровень генотоксичности ДО зарегистрирован в районе, расположенном в 500 м ниже г. Азов [13]. Фактор индукции составил 2.2–2.9. Согласно данным, приведенным в [22], максимальное загрязнение воды и ДО Нижнего Дона в 2005 г. также было отмечено в районах выпуска сточных вод очистных сооружений городов Ростов-на-Дону и Азов, в местах впадения притоков Северский Донец, Сал, Аксай, а также в дельте р. Дон. К сожалению, исследования генотоксичности ДО в районах выпуска сточных вод очистных сооружений г. Ростова-на-Дону и р. Сал авторами в тот год не проводились.

Как и в предыдущие годы, в 2005 г. были зафиксированы районы повышенной экологической опасности, в которых концентрации важнейших антропогенных токсикантов превышали ПДК загрязняющих веществ как в воде, так и в ДО.

2006 г. В 2006 г. генотоксический эффект ДО был зарегистрирован в 9 из 13 исследованных районов (таблица), или в 70% случаев. Значение фактора индукции колебалось от 1.6 до 3.4. Причем во всех исследованных пробах ДО генотоксичность зафиксирована без применения метаболической активации, что говорит о преобладании в грунтах мутагенов прямого действия. В случае тестирования генотоксичности ДО с применением метаболической активации низкие значения фактора индукции свиде-

тельствуют о присутствии в грунтах токсичных веществ. Самые высокие величины фактора индукции были отмечены в районе устья р. Сал (2.5) и 500 м ниже (3.4).

2007 г. В июне 2007 г. наблюдалось снижение генотоксичности ДО, которое можно объяснить процессами естественного самоочищения водоема, в частности – вымыванием генотоксикантов из грунтов течением. Тем не менее, на участках в 500 м выше устья р. Аксай, 500 м ниже устья р. Маныч и в устье р. Маныч наблюдаются относительно постоянные значения генотоксичности ДО, что свидетельствует о наличии в данных районах устойчивого загрязнения грунтов генотоксикантами (таблица).

Рассматривая полученные результаты, в целом можно отметить, что наблюдается определенная положительная динамика снижения количества загрязненных участков. В период развития промышленности и сельскохозяйственного производства наблюдалось значительное поступление в водоемы загрязняющих веществ разной природы. В последние годы спектр и концентрации загрязняющих веществ в разных компонентах экосистемы несколько уменьшились. В частности, в течение этих лет регистрировалось наиболее низкое загрязнение воды Нижнего Дона стойкими ХОП [22–24].

Снижение загрязнения вод можно также объяснить закрытием ряда промышленных предприятий области, проведением ремонтно-восстановительных и реконструкционных работ на очистительных станциях водоканалов городов Ростова-на-Дону, Таганрога, Красного Сулина, Каменска-Шахтинского и других.

Для подтверждения тенденции стабильного снижения генотоксичности среды необходимы более длительные наблюдения за ее динамикой в бассейне Нижнего Дона.

Тем не менее, причиной накопления генотоксических веществ в водоемах могут быть не только промышленные стоки и химизация сельского хозяйства. Достаточно широкий перечень таких соединений содержится в ливневых и бытовых стоках городов. Мутагены могут вырабатываться многими микроорганизмами, водорослями, присутствующими в естественных микробиоценозах. Совпадение временных трендов снижения генотоксичности, спада промышленного производства и снижения применения ядохимикатов в сельском хозяйстве свидетельствует об определяющем характере вклада двух последних источников в накопление генотоксинов в ДО нижнего течения р. Дон.

Число генотоксичных проб, исследованных в течение 2001–2007 гг., составляет в этих районах от 36 до 45%.

Эти районы, по-видимому, можно предложить в качестве контрольных для мониторинга генотоксичности водной среды Нижнего Дона.

ВЫВОДЫ

Изучение генотоксичности ДО Нижнего Дона позволило выявить участки, для которых характерно хроническое загрязнение генотоксинами. На данных участках число генотоксичных проб, исследованных в 2001–2007 гг., составляет в среднем 40%, в то время как для остальных участков оно достигает только 17.9%.

Стабильная регистрация достоверных генетических эффектов позволяет прогнозировать в этих районах деградацию биоресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад “О состоянии окружающей природной среды Ростовской области в 1998 году” / Под ред. Литвинова В.А., Агеева В.Н., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: АУФ, 1999. 274 с.
2. Государственный доклад “О состоянии окружающей природной среды Ростовской области в 2000 году” / Под ред. Водолацкого В.П., Ульянова П.П., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: Ростоблком-природа, 2001. 258 с.
3. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году”. М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, “Центр международных проектов”, 2010. 293 с.
4. Дехта В.А., Кузина В.Ф., Корниенко Г.Г., Шишкина И.В. Эколого-генетические исследования основных компонентов экосистемы Азово-Донского бассейна // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (1998–1999 гг.) / Под ред. Макарова Э.В. Ростов на-Дону: БКИ, 2000. С. 154–159.
5. Корниенко Г.Г. Оценка изменений функционального состояния рыб Азово-Черноморского бассейна // Тез. докл. междунар. конф. “Новые технологии в защите биоразнообразия в водных экосистемах”. М.: МАКС Пресс, 2002. С. 37.
6. Корниенко Г.Г., Дехта В.А., Кузина В.Ф., Шишкина И.В. Эколого-генетический мониторинг загрязнения акваторий Азово-Донского бассейна // Геоэкономические исследования и охрана недр. М.: Геоинформмарк, 2001. Вып. 4. С. 3–9.
7. Корниенко Г.Г., Сапожников В.М., Колесникова Л.В. Биохимический мониторинг антропогенного загрязнения и репродуктивные качества азовских осетровых рыб в современный период // Тез. докл. междунар. конф. “Осетровые на рубеже XXI века”. Астрахань: КаспНИРХ, 2000. С. 141–142.
8. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
9. Методы общей бактериологии / Под ред. Герхардта Ф. М.: Мир, 1984. Т. 2. 470 с.
10. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.
11. Птицын Л.Р. Биолюминесцентный анализ SOS-ответа клеток *E. coli* // Генетика. 1996. Т. 32. № 3. С. 354–358.
12. Сазыкина М.А. Генотоксичность донных отложений реки Дон и Азовского моря // Изв. вузов. Сер. Естественные науки. 2003. № 3. С. 78–80.
13. Сазыкина М.А., Абросимова К.С. Генотоксичность донных отложений реки Дон (2001–2005 гг.) // Сб. тр. III науч.-практ. конф. “Экологические проблемы. Взгляд в будущее”. Ростов-на-Дону: Копицентр, 2006. С. 197–198.
14. Сазыкина М.А., Чистяков В.А. Генотоксичность донных отложений реки Дон и Азовского моря (2001–2003 гг.) // Тез. докл. Второй междунар. науч. конф. “Биотехнология – охране окружающей среды”. М.: Спорт и культура, 2004. С. 192.
15. Сазыкина М.А., Чистяков В.А., Войнова Н.В. Способ определения генотоксичности химических веществ. Патент РФ № 2179581. БИ. 2002. № 5. 5 с.
16. Семенов А.Д., Коропенко Е.О. Динамика пестицидного загрязнения Нижнего Дона // Тез. докл. междунар. конф. “Новые технологии в защите биоразнообразия в водных экосистемах”. М.: МАКС Пресс, 2002. С. 215.
17. Семенов А.Д., Короткова Л.И., Сапожникова Е.В., Коропенко Е.О. Современное состояние пестицидного загрязнения водных объектов Азовского бассейна // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: Сб. науч. тр. (1998–1999 гг.) / Под ред. Макарова Э.В. Ростов-на-Дону: БКИ, 2000. С. 301–306.
18. Тихонова Л.С., Чистяков В.А. Мониторинг экологического состояния р. Дон и Таганрогского залива // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азовского бассейна / Под ред. Макарова Э.В. Ростов-на-Дону: Полиграф, 1996. С. 71–74.
19. Экологический вестник Дона “О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2002 году” / Под ред. Назарова С.М., Остроуховой В.М., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону, 2003. 291 с.
20. Экологический вестник Дона “О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2003 году” / Под ред. Назарова С.М., Остроуховой В.М., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: Артель, 2004. 262 с.
21. Экологический вестник Дона “О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2004 году” / Под ред. Назарова С.М., Остроуховой В.М., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: Синтез технологий, 2005. 298 с.
22. Экологический вестник Дона: о состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2005 г. / Под ред. Назарова С.М., Остроуховой В.М., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: Синтез технологий, 2006. 350 с.
23. Экологический вестник Дона “О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2006 году” / Под ред. Назарова С.М.,

- Остроуховой В.М., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: Синтез технологий, 2007. 300 с.
24. Экологический вестник Дона “О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2007 году”/ Под ред. Назарова С.М., Скрипки Г.И., Парашенко М.В. Ростов-на-Дону: Синтез технологий, 2008. 372 с.
 25. Ames B.N., Gold L.S. The causes and prevention of cancer: the role of environment // *Biotherapy*. 1998. V. 11. № 2–3. P. 205–220.
 26. Aubrecht J., Caba E. Gene expression profile analysis: an emerging approach to investigate mechanisms of genotoxicity // *Pharmacogenomics*. 2005. V. 6. № 4. P. 419–428.
 27. Baumstark-Khan C., Rabbow E., Rettberg P., Horneck G. The combined bacterial Lux-Fluoro test for the detection and quantification of genotoxic and cytotoxic agents in surface water: results from the “Technical Workshop on Genotoxicity Biosensing” // *Aquat Toxicol.* 2007. V. 85. № 3. P. 209–218.
 28. Daniel R., Almog R., Ron A. et al. Modeling and measurement of a whole-cell bioluminescent biosensor based on a single photon avalanche diode // *Biosens. Bioelectron.* 2008. V. 24. № 4. P. 888–893.
 29. Dawson J.J., Iroegbu C.O., Maciel H., Paton G.I. Application of luminescent biosensors for monitoring the degradation and toxicity of BTEX compounds in soils // *J. Appl. Microbiol.* 2008. V. 104. № 1. P. 141–151.
 30. Dizer H., Wittekindt E., Fischer B., Hansen P.D. The cytotoxic and genotoxic potential of surface water and wastewater effluents as determined by bioluminescence, umu-assays and selected biomarkers // *Chemosphere*. 2002. V. 46. № 2. P. 225–233.
 31. Dragone R., Frazzoli C., Grappelli C., Campanella L. A new respirometric endpoint-based biosensor to assess the relative toxicity of chemicals on immobilized human cells // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2009. V. 72. № 1. P. 273–279.
 32. Menzel R., Swain S.C., Hoess S. et al. Gene expression profiling to characterize sediment toxicity – a pilot study using *Caenorhabditis elegans* whole genome microarrays // *BMC Genomics*. 2009. <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/10/160>
 33. Niu S.Y., Wang S.J., Shi C., Zhang S.S. Studies on the fluorescence fiber-optic DNA biosensor using p-hydroxyphenylimidazo[f] 1,10-phenanthroline ferrum [III] as indicator // *J. Fluoresc.* 2008. V.18. № 1. P. 227–235.
 34. Ohe T., Watanabe T., Wakabayashi K. Mutagens in surface waters: a review // *Mutat. Res.* 2004. V. 567. № 2–3. P. 109–149.
 35. Palchetti I., Mascini M. Nucleic acid biosensors for environmental pollution monitoring // *Analyst*. 2008. V. 133. № 7. P. 846–854.
 36. Sasek V., Bhatt M., Cajthaml T. Compost-mediated removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2003. V. 44. № 3. P. 336–342.
 37. Tak Y.K., Naoghare P.K., Lee K.H. Green fluorescent protein [GFP] as a direct biosensor for mutation detection: elimination of false-negative errors in target gene expression // *Anal. Biochem.* 2008. V. 380. № 1. P. 91–98.
 38. Wanekaya A.K., Chen W., Mulchandani A. Recent biosensing developments in environmental security. Wanekaya AK, Chen W, Mulchandani A. Recent biosensing developments in environmental security // *J. Environ. Monit.* 2008. V. 10. № 6. P. 703–712.
 39. Watson W.P., Mutti A. Role of biomarkers in monitoring exposures to chemicals: present position, future prospects // *Biomarkers*. 2004. V. 9. №. 3. P. 211–242.