

of heavy metals and utilization of its byproducts [Text] / M. Ghosh, S. P. Singh // Applied Ecology and Environmental Research. – 2005. – V. 3 (1). – P. 1–18.

6. **Baker, A. J. M.** Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry [Text] / A. J. M. Baker, R. R. Brooks // Biorecovery. – V. 1. – P. 81–126.

7. **Brooks, R. R.** Plant that hyperaccumulate heavy metals (their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining) [Text] /

R. R. Brooks. – Wallingford : CAB International, 1998. – 380 p.

Материал поступил в редакцию 28.05.09.

**Андреева Ирина Викторовна**, кандидат биологических наук, руководитель бизнес-инкубатора

Тел. 8 (495) 977-78-94

**Байбеков Равиль Файзрахманович**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Тел. 8 (495) 976-47-89

**Злобина Мария Владимировна**, младший научный сотрудник лаборатории почвенных исследований

Тел. 8 (495) 976-12-48

УДК 502/504 : 631.4

**Ю. П. ДОБРАЧЕВ, А. Н. КУЛИКОВ, К. Н. ЕВСЕНКИН**

Государственное научное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова»

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АГРОЦЕНОЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ АГРОСИСТЕМЫ

*В работе показана возможность использования имитационной модели агроценоза при анализе временных рядов урожайности яровой пшеницы для оценки и выявления деградации почвенного покрова, приводящей к снижению мощности корнеобитаемой зоны. На основе анализа этих данных по Рязанской области выделены районы, для которых коэффициент вариации временного ряда урожайности выше по сравнению с другими. Выборочные обследования полей подтвердили наличие уплотнения и слитизации почв.*

*Имитационная модель, уплотнение почвы, деградация, мониторинг, яровая пшеница.*

*The research shows the possibility of using agrocenosis simulation model for the time series analysis of the spring wheat yield with a purpose of estimation and revelation of the soil cover degradation leading to reduction of the root zone capacity. On the basis of these data on the Ryazan region there are special regions for which the variation coefficient of the time series productivity is higher in comparison with others. Field selective investigations confirmed the availability of soil compaction and packing.*

*A simulation model, soil compaction, degradation, monitoring, spring wheat*

Использование имитационных моделей агроценозов в системах управления технологиями выращивания сельскохозяйственных культур представляет несомненный интерес для оценки состояния сельскохозяйственных угодий. Такая оценка может быть

сделана путем сопоставления фактической и расчетной продуктивности.

Возможность использования в сценарных исследованиях консервативной составляющей (характеристики почвы) и динамичной составляющей (многолетний ряд погодных условий) входной

информации позволяет получить динамику продуктивности сельскохозяйственных земель при неизменных характеристиках почв. Поскольку плодородие почв не остается постоянным, сравнение расчетных рядов урожайности с фактическими данными об урожайности может позволить выявить тенденции трансформации почвенного покрова. Достоинство такого подхода состоит в следующем: анализируются не точечные и локальные данные, а площадные и даже региональные. Выявление тенденций в состоянии почв позволяет использовать информационный, методический и инструментальный ресурсы регионального мониторинга для определения причин деградации земель.

Такой подход был реализован для диагностики глубины корнеобитаемого слоя, которая может служить показателем сработки, переуплотнения и слитизации почвенного покрова. В качестве «сенсорной системы» был взят посев яровой пшеницы, характеризующейся чувствительной к состоянию почвы корневой системой. Так, например, анализируя динамику урожайности зерновых культур и пшеницы (по данным Загайтова, ЦСУ и др.), авторы провели оценку колебания урожайности по годам (рис. 1). Рассчитывали значения дисперсии и стандартного отклонения от линии тренда по десятилетиям, начиная с 1960 г. (коэффициент корреляции 0,96 и 0,78 соответственно). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

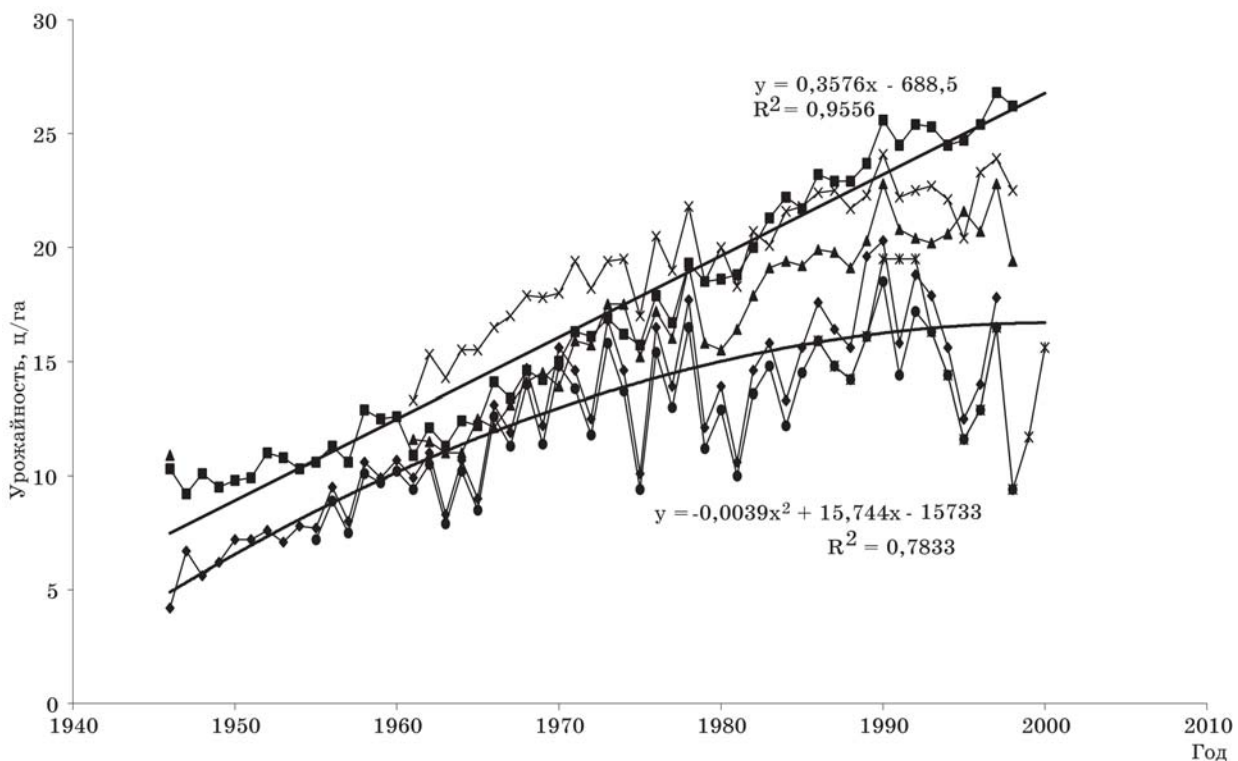


Рис. 1. Динамика урожайности зерновых культур с 1946 по 2000 г. Глобальные данные: —×— ячмень; —■— пшеница; —▲— рожь; данные по СССР, РФ: —\*— зерновые (ЦСУ); —◆— зерновые (по Загайтову); —●— зерновые (АРИС); ——— линии тренда

При проведении анализа использовали предположение, что по мере уплотнения почвенного покрова тяжелой техникой колебания урожайности могут расти за счет ухудшения воднофизических свойств почв и уменьшения глубины корнеобитаемого слоя. Из приведенных данных видно, что по мере

роста урожайности растет амплитуда колебаний — дисперсия и стандартное отклонение, причем наиболее значительный рост этих величин происходит в 70 и 90-е гг. прошлого века. Этот факт можно объяснить тем, что в период 60–70-х гг. сельское хозяйство возрастало темпами обеспечивалось

Таблица 1  
**Динамические характеристики урожайности зерновых культур (по данным И. Б. Загайтова)**

Годы	Средняя	Дисперсия	Стандартное отклонение	Квадрат отклонения от линейного тренда
1961–1970	11,6	2,2	1,5	20,1
1971–1980	14,3	5,4	2,3	48,9
1981–1990	15,9	2,2	1,5	19,6
1991–1997	16,1	4,7	2,2	28,2

сельскохозяйственной техникой, в том числе тяжелой, что повлекло за собой переуплотнение почв и развитие процессов ее деградации (рис. 2). Некото-

рая стабилизация колебаний урожайности в 80-е гг. была обусловлена вводом значительных площадей орошаемых земель и ужесточением требований к эксплуатации орошаемых земель.

После катастрофического разрушения оросительных систем в начале 90-х гг. стабилизирующий фактор производства – выращивание зерновых культур на орошаемых землях – стал утрачивать свое значение, и колебания урожайности вновь стали нарастать. Более того, деградация почвенного покрова, в том числе связанная с переуплотнением почв, по представлениям авторов, способствовала тому, что темпы роста урожайности в Российской Федерации стали прогрессирующим образом отставать от темпов роста урожайности других стран.

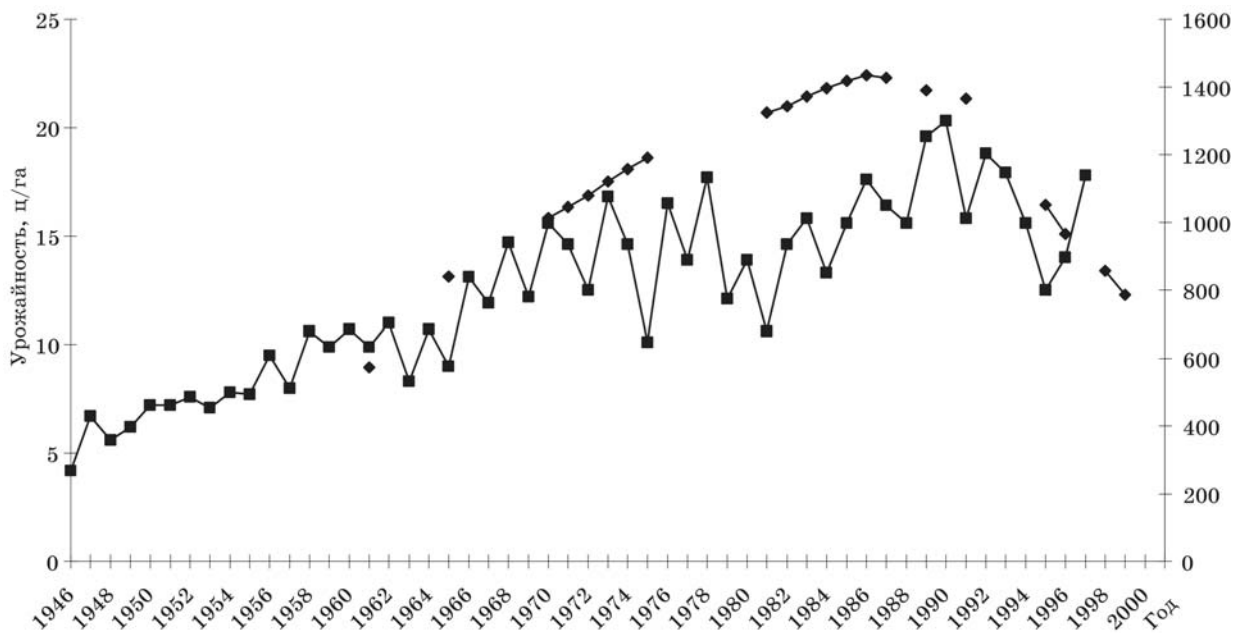


Рис. 2. Динамика урожайности зерновых культур и количество тракторов, используемых в сельскохозяйственном производстве: ■ — ряд Загайтова для России; ◆ — тракторы, тыс. шт.

Для реализации изложенного подхода по выявлению возможных трансформаций почвенного покрова проводили исследования, которые можно разбить на несколько этапов. Первый этап: на уровне физической и имитационной модели изучали влияние ограничения роста корневой системы яровой пшеницы на урожайность. Второй этап: анализировали статистические данные за ряд лет по урожайности

яровой пшеницы по районам Рязанской области, проводили численные эксперименты по оценке урожайности для трех основных типов почв Рязанской области: подзолистым супесчаным, серым лесным, чернозему выщелоченному (по погодным условиям представленной выборки лет). Третий этап: по районам, отличающимся высокой вариабельностью урожайности яровой пшеницы, на полях (выборочно) проводили

измерения твердости почвы по всему профилю и отборы почвенных проб с целью выяснения причин аномалий в динамике урожайности.

Для оценки адекватности функционирования имитационной модели агроценоза яровой пшеницы был поставлен микроделяночный полевой эксперимент. На различную глубину были заложены пленочные экраны, пропускающие воду и непроницаемые для корней. Варианты опыта: контроль (без экрана); экран на глубине 20, 30, 40 и 50 см от поверхности почвы. Размер площадки – 1 м<sup>2</sup>, размер экрана – 1,69 м<sup>2</sup>. Плотность посева семян – 500 зерен/м<sup>2</sup>, глубина заделки семян – 6 см. Способ сева – рядковый; в опытах использованы семена пшеницы сорта «московская-35».

При выполнении численных экспериментов по оценке влияния глубины распространения корней в почвенном горизонте для модели яровой пшеницы был сформирован пакет входной информации, включающий метеорологические данные, почвенные условия, агротехнические характеристики выращивания.

Сравнение результатов полевого опыта и численных экспериментов показало, что по урожайности и массе зерновки получено удовлетворительное соответствие (табл. 2). Анализ динамики развития посевов в условиях полевого опыта и в имитационных экспериментах показал, что наилучшее совпадение фаз развития наблюдается для контрольного варианта и для варианта с экраном на глубине 50 см (табл. 3).

Таблица 2

**Опытные и расчетные параметры урожая яровой пшеницы по вариантам опыта**

Вариант	Масса соломы, ц/га		Урожайность, ц/га		Масса 1000 зерен, г	
	Фактическое значение	Расчетное значение	Фактическое значение	Расчетное значение	Фактическое значение	Расчетное значение
Контроль	22,0		18,1	19,6	35,3	38,0
20 см	12,0		7,9	8,8	27,7	27,7
30 см	18,1		13,2	10,9	32,2	30,7
40 см	23,0		14,5	14,1	33,0	34,0
50 см	23,5		18,0	17,4	37,9	36,6

Анализ результатов полевых опытов и численных экспериментов показал, что для повышения адекватности функционирования модели при расчете скорости роста корней необходимо учитывать величину механического сопротивления почвы при продвижении корней в почвенном горизонте. Так, в контроле отсутствовало разрыхление почвы на всю глубину распространения корней, что отразилось на динамике роста и величине продуктивности посева. Таким образом, установлено, что имитационная модель агроценоза позволяет прогнозировать влияние мощности корнеобитаемого слоя почвы на продуктивность агроценоза.

Для девяти районов Рязанской области был выполнен анализ статистических данных за 1993–2002 гг. по характеристикам временного ряда

урожайности яровой пшеницы и поставлена серия численных экспериментов, в которых получены аналогичные временные ряды урожайности для условий с ограничением роста корней (табл. 3, 4). При этом в качестве рабочей гипотезы принималось следующее допущение. Диапазон активной влаги и глубина почвенного горизонта, доступного корням растений, в совокупности не только определяют накопленный весной доступный влагозапас почвы, но и гарантируют эффективность последующего использования выпадающих в период вегетации растений осадков. При прочих равных условиях (погодных, пищевых и агротехнических) можно ожидать, что величина средней по годам урожайности и ее вариации будут связаны с перечисленными характеристиками почвы.

Таблица 3

**Статистические характеристики динамики урожайности яровой пшеницы по районам Рязанской области за 1993–2002 годы**

Почвы	Район	Средняя урожайность $U_{cp}$ , ц/га	Стандартное отклонение $S$	$C = S/U_{cp}$
Дерново-подзолистые супесчаные	Клепиковский	5,95	4,31	0,72
	Касимовский	6,92	7,84	1,13
	Спасский	5,65	4,04	0,71
Серые лесные	Рязанский	22,16	7,32	0,33
	Старожиловский	19,89	9,47	0,47
	Путятинский	10,04	10,19	1,01
Чернозем выщелоченный	Сараевский	14,68	2,90	0,19
	Милославский	15,48	6,35	0,41
	Новодеревенский	18,55	12,66	0,68

Таблица 4

**Данные численных экспериментов по урожайности яровой пшеницы (по метеоусловиям города Рязани)**

Слой почвы, см	Урожайность яровой пшеницы по метеорологическим условиям года, ц/га							Среднее арифметическое $U_{cp}$	Стандартное отклонение $S$	Коэффициент вариации $C = S/U_{cp}$
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001			
Дерново-подзолистые почвы										
0...20	2,0	8,1	3,6	4,0	0	6,5	–	4,03	2,94	0,73
0...30	3,5	9,8	5,2	4,2	0	7	–	4,95	3,32	0,67
0...40	4,2	10,4	9,6	4,2	0	8,6	–	6,17	4,03	0,65
0...50	4,6	10,8	13,5	5,2	0	9,7	–	7,30	4,93	0,68
0...80	6,9	11,4	18,5	8,1	0	11,4	–	9,38	6,12	0,65
Серые лесные почвы										
0...20	13,9	14,1	16,9	3,6	2,2	19,1	–	11,63	7,05	0,61
0...30	18,3	17,5	22,1	5,3	2,9	23,7	–	14,97	8,76	0,59
0...40	22,6	20,1	25,2	6,8	5,2	25	–	17,48	9,10	0,52
0...50	24,6	21,8	27,8	8,1	7,3	25,8	–	19,23	9,15	0,48
0...80	26,3	28	32,9	10	9,2	26,8	–	22,20	10,04	0,45
Черноземы выщелоченные										
0...20	8,5	8,9	6,3	6,8	0,4	8,9	3,1	6,13	3,25	0,53
0...30	10,6	9,7	6,2	7,4	1,3	9,4	3,6	6,89	3,43	0,50
0...40	13,4	10,8	8,2	8	2,4	9,7	4,1	8,09	3,80	0,47
0...50	15,0	11,6	9,9	8,4	3,1	9,9	4,7	8,94	4,04	0,45
0...80	18,8	14,9	19,3	9,3	10,1	10,3	11,7	13,49	4,21	0,31

*Примечание:* в сценарных исследованиях модель агроценоза яровой пшеницы адаптирована: для дерново-подзолистых почв – по данным ОПХ «Полково»; для серых лесных почв – по данным учхоза «Стенькино»; для черноземов – по среднестатистическим данным урожайности яровой пшеницы в черноземной зоне Рязанской области.

Коэффициент вариации в данном случае характеризует устойчивость агроэкосистемы. Наблюдается характерное снижение значения коэффициента вариации как с ростом глубины корнеобитаемого слоя, так и при переходе от одного типа почвы к другому. Такое закономерное снижение коэффициента вариации отражает устойчивость травяных фитоценозов и их нарастающую способность конкурировать с лесной экосистемой

(древесной растительностью).

Сравнение коэффициентов вариации по табл. 3 и 4 показывает следующее: 1) диапазоны значений коэффициентов вариации рядов, привязанных к типу почв, близки по величине и имеют пересекающиеся области: дерново-подзолистые – 0,63...0,73 и 0,71...1,13; серые лесные – 0,45...0,61 и 0,33...1,01; черноземы – 0,31...0,53 и 0,19...0,68; 2) нижние границы коэффициентов

вариации снижаются в соответствии с зональным положением типов почв. Таким образом, показано, что имитационная модель агроценоза позволяет адекватно прогнозировать влияние глубины проникновения корней на продуктивность агроценоза и динамику урожайности в зависимости от почвенно-климатических условий (рис. 3).

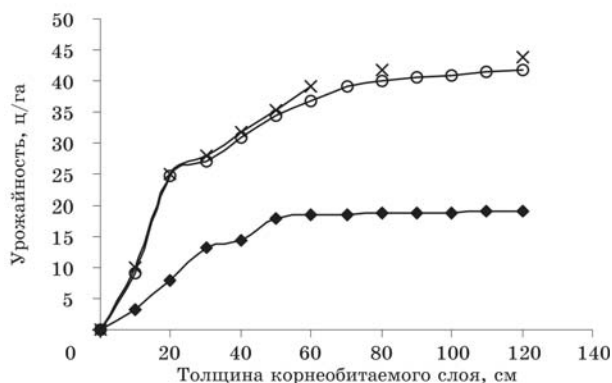


Рис. 3. Зависимость урожайности от толщины корнеобитаемого слоя для дерново-подзолистых супесчаных (ряд 1), серых лесных почв (ряд 2) и выщелоченных черноземов (ряд 3) по метеоусловиям 1997 г.: —♦— ряд 1; —◆— ряд 2; —×— ряд 3

В соответствии с выполненными прогнозными расчетами проявления деградации почв по районам Рязанской области в сентябре 2003 г. проводились полевые работы по измерению твердости и объемной плотности почв. Наибольший интерес представлял сравнительный анализ состояния почв в наиболее благополучных и неблагополучных районах, расположенных на одинаковых почвах. Такому сравнительному анализу подверглись поля учхоза «Стенькино» Рязанского района, поля Путятинского района, а также Сараевского и Новодеревенского районов. При отборе образцов проводилась оценка органолептического механического состава и корневых остатков.

В результате проведенных в Путятинском районе исследований не было обнаружено значительных уплотнений почвенного покрова. Однако, по мнению авторов, серые лесные почвы этого района обладают более высокой способнос-

тью уплотнения, при распахке и весенней обработке образуется подплужная подошва. На рис. 4 представлены результаты измерения твердости почвы по следу комбайна.

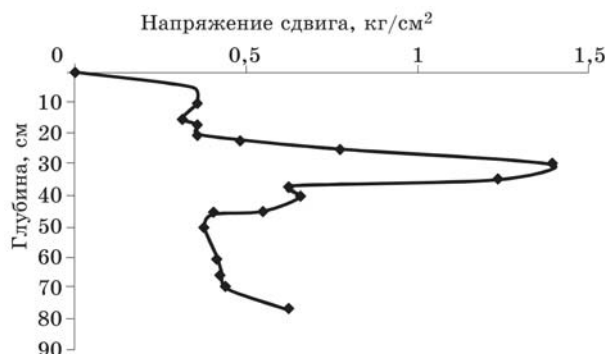


Рис. 4. Изменение твердости серой лесной почвы от глубины (Путятинский район). Зерновое поле после уборки. Стандартное отклонение – 7...16 % от среднего. Плотность почвы: слой 15...25 см – 1,28 г/см³; слой 30...40 см – 1,54 г/см³

Аналогичные сравнительные исследования проведены на полях Сараевского и Новодеревенского районов. При отборе проб почвы на глубине 150 см обнаружены корни сорной растительности. Исследования структуры почвы показали, что физический песок практически отсутствует, почвы структурированы по всему профилю. В Новодеревенском районе на глубине 20...30 см обнаружено некоторое уплотнение почвы, вызванное образованием подплужной подошвы. В целом твердость почв Новодеревенского района превосходит твердость почв в Сараевском районе на 0,2...0,3 кг/см². В образцах, отобранных с глубины ниже 50 см, не обнаружено корневых остатков. В подпахотных горизонтах наблюдалась слитая структура почвы, что, по мнению авторов, является основной причиной, препятствующей проникновению корней в почвенный горизонт из-за нарушения дыхания.

Результаты выполненных исследований показывают перспективность применения имитационных моделей и сценарных исследований в анализе

мониторинговой информации агроэкосистем, в том числе для выявления и оценки процессов деградации почв. Имитационная модель яровой пшеницы обладает необходимой гибкостью и хорошо адаптируется к почвенно-климатическим условиям лесостепной зоны России. Полученные статистические характеристики временных рядов урожайности могут служить показателем экологической устойчивости агроландшафта.

Материал поступил в редакцию 05.09.09.

**Добрачев Юрий Павлович**, доктор технических наук, заведующий лабораторией

Тел. 8 (499) 153-07-29

E-mail: [dobrachev@vniigim.ru](mailto:dobrachev@vniigim.ru)

**Куликов Андрей Николаевич**, соискатель, директор ОПХ «Полково»

Тел. 8-9109023830

**Евсенкин Константин Николаевич**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией

Тел. 8 (491) 22-87-640

УДК 502/504 : 502.55

**В. А. ВЛАСОВ, В. И. СМЕТАНИН**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## **ЭКОЛОГО-МЕЛИОРАТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ВОССТАНОВЛЕНИЮ МАЛЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ**

*Важнейшим элементом урбосистем являются водные объекты, состояние которых во многом определяет социальную привлекательность городской территории, ее эстетическое восприятие. Поэтому разработка научных основ инженерно-экологического обустройства городских водных объектов представляет собой достаточно актуальную задачу.*

*Урбосистема, водный объект, рекреация, экологическое состояние, инженерно-экологическое обустройство.*

*The major element of urban systems is reservoirs. Their condition in many respects determines a social attractiveness of the urban territory, its aesthetic perception. Therefore working out of scientific bases of the engineering – ecological development of urban ponds is quite an actual task.*

*Urban system, reservoir, recreation, ecological condition, engineering-ecological development.*

Развитие цивилизации сопряжено с образованием центров урбанизации. Урбанизация – это исторический процесс роста городов и городского населения, характеризуемый повышением роли городов в жизни общества и широким распространением городского образа жизни. Образование центров

урбанизации изначально было связано с развитием путей сообщения, решением транспортных вопросов, а в более поздний период – с необходимостью коммунального и промышленного водоснабжения городов и сложившихся мегаполисов. Урбанизация создает достаточно сложный комплекс проблем,