

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УЧАСТКЕ Р. ОБЬ У Г. БАРНАУЛА

А.Т. Зиновьев, К.В. Марусин, А.А. Шибких, В.А. Шлычков, М.В. Затиначий

С использованием ГИС-технологий разработана компьютерная модель русловых процессов на участке р. Обь у г. Барнаула и выполнены расчеты русловых процессов для бытовых условий и при проведении укрепления берегов рек Обь и Барнаулка.

## ВВЕДЕНИЕ

Моделирование русловых процессов является одной из наиболее сложных задач речной гидравлики. Актуальность исследования русловых процессов вызвана наличием в непосредственной близости возле рек населенных пунктов, коммуникаций, сельхозугодий и других объектов человеческой деятельности, строительством гидротехнических сооружений, развитой системой речных перевозок. Негативными проявлениями процессов деформации русел являются размывы берегов, перераспределение водных потоков, обмеление судоходных участков и т.д.

Любое антропогенное вмешательство, приводящее к изменениям геометрии речного русла, объемам стока воды или объемам твердого стока в пределах урбанизированной территории должно быть подвергнуто тщательному анализу.

В связи с планируемым проведением берегоукрепительных работ в районе устья р. Барнаулка и соответствующей реконструкцией русла реки выполнены численные исследования русловых процессов на участке р. Обь у г. Барнаула в современных условиях и после выполнения работ по укреплению берегов рек Обь и Барнаулка.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований является участок р. Обь в районе г. Барнаула протяженностью 6 км вниз по течению от нового автомобильного моста до старого автомобильного и железнодорожного мостов (рис. 1). На участке реки поддерживается пассажирское и грузовое судоходство, функционирует речной пассажирский порт и два грузовых причала (в районе залива "Ковш"). В затоне "БРВПИС" располагается речная техника. Русло Оби в пределах данного участка имеет ширину 0,5-0,7 км, сложено песчано-глинистыми грунтами, неустойчиво, с частыми перекатами, отмелями и островами. На перекатах регулярно проводятся дноуглубительные работы [1].

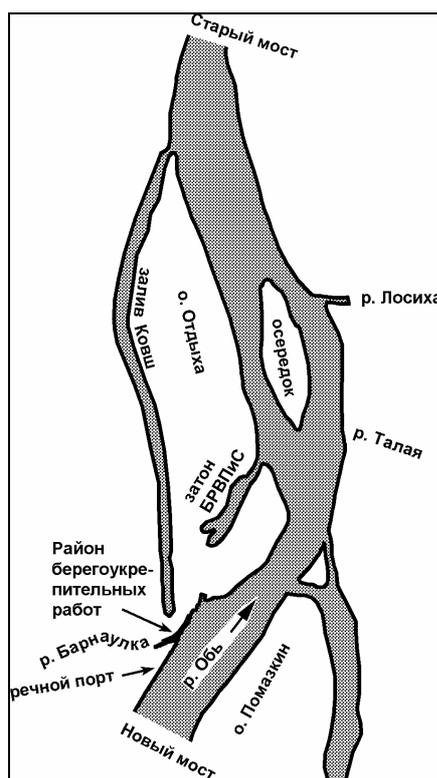


Рисунок 1 – Объект исследования

Сопоставительный анализ карт русловой съемки за 6 лет (2000-2005 гг.) позволяет говорить о том, что рассматриваемый участок р. Обь характеризуется интенсивными русловыми деформациями (рис. 2). Цифрами на рис. 2 отмечены участки наиболее значительных русловых деформаций: 1 – рост левобережного побочня ниже по течению устья р. Барнаулки; 2 – смещение осередка влево в районе переката "Барнаульский"; 3 – деформация горловины залива "Ковш". Таким образом, динамика русла Оби в последние годы характеризуется постепенным отклонением динамической оси потока к правому берегу, которое сопровождается ростом левобережных побочней ниже устья Барнаулки и у входа в Ковш, а также смещением осередка,

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УЧАСТКЕ Р. ОБЬ У Г. БАРНАУЛА

расположенного у переката Барнаульский, к центру русла реки.

Руслоформирующий расход, т.е. расход, при котором в многолетнем плане осуществляется основной сток наносов и наиболее активно происходят русловые деформации, для Оби у г. Барнаул составляет  $2800 \text{ м}^3/\text{с}$  и имеет обеспеченность 26 %. Причем при его пропуске река остается в бровках поймы [2].

Проектируемые варианты берегоукрепительных работ (1 и 2) приведут к изменению геометрии русла Оби (рис. 3). В месте наибольшего изменения поперечного сечения реки построен поперечный профиль, для которого рассчитана зависимость изменения площади сечения русла реки от уровня воды (рис. 4).

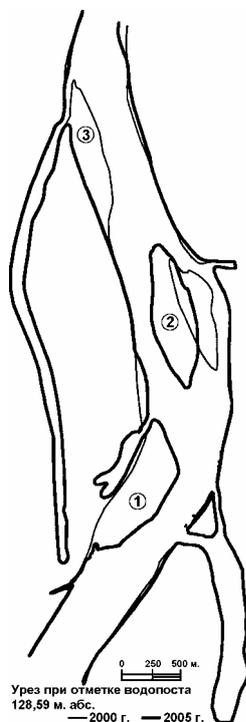


Рисунок 2 – Деформации русла р. Обь у г. Барнаула в 2000-2005 гг

Для оценки влияния изменения геометрии русла в результате проведения планируемых берегоукрепительных работ было выполнено математическое моделирование русловых процессов на участке реки Обь как в бытовых условиях, так и после различных реконструкций русла в районе устья р. Барнаулки.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С учетом сложной геометрии русла р. Обь и обширной поймы у г. Барнаул для расчета поля скорости в открытом потоке ис-

пользуется двумерная (плановая) модель, применявшаяся для моделирования русловых процессов на участках р. Обь, расположенных выше и ниже по течению исследуемого участка: у барнаульского водозабора № 2 [3] и у сел Кучук и Сибирка Шелаболихинского района [4], соответственно.

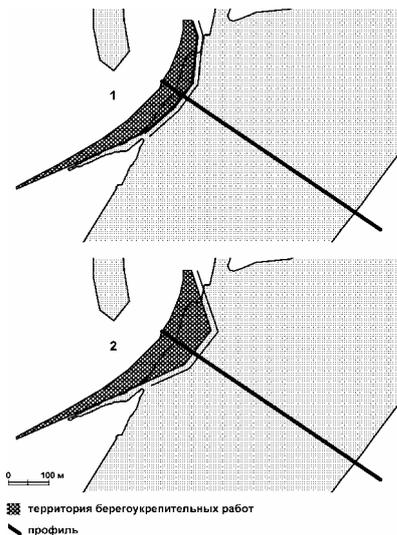


Рисунок 3 – Варианты берегоукрепления 1 и 2

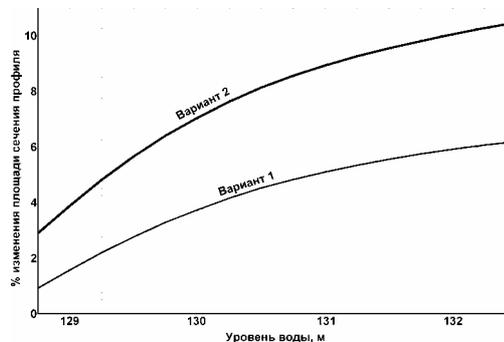


Рисунок 4 – Изменение площади живого сечения русла р. Обь (в процентах) от уровня воды при различных вариантах проведения берегоукрепительных работ

Для расчета русловых переформирований система уравнений для описания динамики речного потока дополняется двумерным уравнением русловых деформаций

$$(1 - p) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $x, y$  – декартовы координаты;  $t$  – время;  $\bar{q} = (q_x, q_y)$  – вектор удельного (на единицу поперечной длины) расхода наносов;  $z$  – отметка дна;  $p$  – коэффициент

пористости грунта, принимаемый для песка 0,4

При замыкании системы уравнений используется следующая полуэмпирическая зависимость, связывающая расход наносов взвешенных и влекомых наносов [5,6] с параметрами потока

$$q = \frac{0.05U^5}{(s-1)\sqrt{gd_{50}C^3}}, \quad ([q]=\text{м}^2/\text{с}) \quad (2)$$

где  $q$  – полный расход наносов через единицу поперечной длины;  $U$  – средняя по глубине скорость потока, м/с;  $s=\rho_s/\rho$  – удельная плотность наносов (2.65 – для кварцевых песков);  $\rho_s$  – плотность наносов (2650 – для песков), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $d_{50}$  – медианная крупность наносов;  $C$  – коэффициент Шези, м<sup>0.5</sup>/с.

Локальный коэффициент Шези определяется из следующего выражения [7,8]:

$$C = \frac{h^{1/6}}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла Маннинга;  $h$  – глубина, м.

Критические (неразмывающие) скорости для русловых наносов определяются по формуле Шамова [7]:

$$U_k = 4.4(d_{50})^{1/3}(h^{1/6}), \quad ([U_k]=\text{м/с}), \quad (4)$$

где  $d_{50}$  – медианная крупность наносов, м;  $h$  – глубина, м.

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Примеры русла р. Обь на рассматриваемом участке выполнялись с 2 по 3 августа 2005 г. В течении этого периода уровни воды в реке менялись по данным в/п Барнаул от 187 см (02.08.05) до 184 см (03.08.05).

Уровни воды при промерных работах приведены к осредненному срезочному уровню. По данным УГМС расходы воды у в/п Барнаул в этот период составляли в среднем 1000 м<sup>3</sup>/с.

Для гидрологической оценки воздействия водохозяйственных мероприятий и проектируемых гидротехнических сооружений на русловые процессы наряду с характеристиками режима стока воды и наносов [9] используются данные о гранулометрическом составе донных руслообразующих наносов.

Инженерно-геологическое обследование участка русла реки в районе строительства проектируемых берегоукрепительных сооружений выполнено в 2006 г. ОАО «Алтайводпроект». Выделение инженерно-геологических элементов донных наносов поверхностного слоя русла проведено по ли-

тологическому составу, показателям состояния, физико-механическим свойствам грунтов с учетом их генезиса и в соответствии с требованиями ГОСТ 20522-96.

Современные аллювиальные отложения русла реки на участке проектируемого берегоукрепления представлены одним инженерно-геологическим элементом ИГЭ-3 – песок мелкий влажный и насыщенный водой светло-желтый. Залегает песок в русле реки и на прирусловой отмели слоем мощностью до 12 м. По результатам шести определений получены следующие средние значения гранулометрического состава песка (см. также рис. 5):

- частиц 1-0,5 мм – 8 %;
- частиц 0,5-0,25 мм 39 %;
- частиц 0,25-0,10 мм – 43 %;
- частиц менее 0,10 мм – 10 %.

Параметры крупности (характерные диаметры) соответственно равны:  $d_{35}=0.19$  мм;  $d_{50}=0.24$  мм;  $d_{90}=0.49$  мм;  $d_{95}=0.69$  мм.

Угол естественного откоса в сухом состоянии равен 30°, под водой – 23°.

### ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА

ЦМР речной долины при использовании конечно-разностных методов для решения гидродинамической задачи должна иметь вид регулярной сетки со значениями высот в её узлах. Величина шага этой сетки ограничена сверху требованиями математической модели [10]: значимые особенности рельефа русла должны быть отображены в цифровой модели; цифровая модель не должна иметь выродившихся участков. Снизу величина шага ограничена возможностью вычислительной техники в разумные сроки выполнить как построение самой ЦМР, так и численные расчеты. Для построения цифровой модели русла исследуемого участка р. Обь была выбрана величина шага сетки шесть метров.

При построения ЦМР русла реки была использована следующая информация: положение береговой линии, отметки уровня воды и отметки глубины. Необходимые данные были получены с помощью картосхемы глубин участка русла масштаба 1:10 000 за 02-03.08.2005, таблицы с отметками расчетного уровня воды на этот же период времени. Также для подробного описания рельефа русла реки в районе берегоукрепительных работ был использован топоплан русловой съемки масштаба 1:500 на эту территорию. По описанным выше данным была построена сетка со значениями абсолютных высот на русловую часть исследуемого участка реки.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УЧАСТКЕ Р. ОБЬ У Г. БАРНАУЛА

Для построения ЦМР прирусловой территории были использованы листы топопланов масштаба 1:10 000. После процедуры сведения двух ЦМР была получена единая ЦМР исследуемого участка реки. Создание, анализ и преобразование ЦМР в формат данных, используемый программой моделирования скоростей течения производились с помощью ГИС ArcView и ArcGis. Дополнительно были созданы ЦМР исследуемого участка при различных вариантах проведения берегоукрепительных работ. Дополнительными данными для этих ЦМР явились инженерные планы масштаба 1:500 проектируемых берегоукрепительных мероприятий.

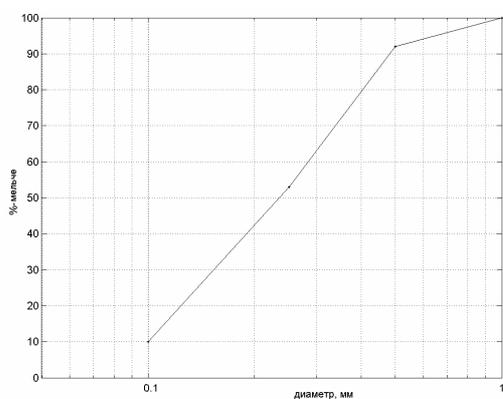


Рисунок 5 – График гранулометрического состава руслообразующих наносов на участке проектируемого берегоукрепления

### КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ

На основе математических моделей кинематики речного потока, транспорта руслообразующих расходов и ЦМР речной долины была построена компьютерная модель русловых процессов на рассматриваемом участке р. Обь у г. Барнаула. Для калибровки компьютерной модели русловых процессов были рассчитаны глубины и скорости на исследуемом участке р. Обь в бытовых условиях для меженных расходов ( $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и получено хорошее качественное и количественное совпадение расчетных величин с данными натурных измерений.

Результаты расчетов размыва-аккумуляции донных наносов в бытовых условиях для разных расходов подтвердили ранее отмеченную тенденцию размыва русла Оби у правого берега и отклонения динамической оси потока вправо. Также было получено подтверждение того, что участок в районе устья р. Барнаулка лежит вне зоны активных многолетних переформирований русла р. Обь, и, следовательно, в месте проек-

тируемого строительства берегоукреплений деформации дна практически отсутствуют.

Расчет течения при руслоформирующем расходе  $q=2800 \text{ м}^3/\text{с}$  показал, что река остается в бровках поймы, что отвечает данным наблюдений [2].

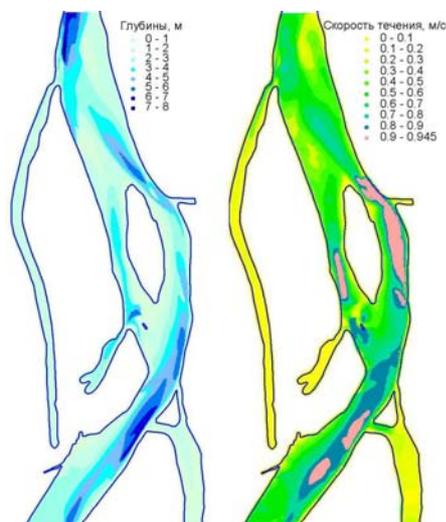


Рисунок 6 – Рассчитанные глубины и скорости речного потока при межennem расходе в бытовых условиях

Выше отмечалась наблюдаемая на рассматриваемом участке реки тенденция размыва русла Оби у правого берега и отклонения динамической оси потока вправо. Результаты расчетов размыва-аккумуляции донных наносов в бытовых условиях для разных расходов подтверждают данную направленность руслового процесса.

Из анализа расчетных данных по деформациям дна следует, что участок в районе устья р. Барнаулки лежит вне зоны активных многолетних переформирований русла. В условиях межени зоны слабого локального размыва чередуются с зонами аккумуляции такой же интенсивности в соответствии с локальными особенностями рельефа. Такое чередование есть проявление медленного перемещения крупных донных гряд, протекающего в основном в условиях межени, когда транспорт влекомых наносов является преобладающим.

С ростом расхода и глубин пространственное распределение расхода наносов приобретает более равномерный характер, интенсивность деформаций дна снижается, сокращается и охваченная ими площадь. Следует особо отметить, что в месте проектируемого строительства берегоукреплений деформации дна практически отсутствуют.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Разработанная компьютерная модель русловых процессов на участке р. Обь в районе устья р. Барнаулка надежно воспроизводит кинематические характеристики речного потока и основные тенденции деформации русла реки в бытовых условиях.

Это позволяет использовать данную модель для прогнозирования и оценки влияния проектируемых берегоукрепительных мероприятий рек Обь и Барнаулка вдоль улицы Приречная на динамику речного потока и развитие руслового процесса на участке р. Обь у г. Барнаула в районе устья р. Барнаулка. Отметим, что в силу сравнительно грубого ( $6 \times 6 \text{ м}^2$ ) сеточного разрешения модель не предназначена для описания мелкокомасштабных возмущений, генерируемых деталями строительных конструкций, применяемых в технологическом цикле берегоукрепления. Можно предполагать малое влияние этих деталей на вдольбереговую скоростную режим в основном русле.

В результате численных расчетов были определены поля скорости как при бытовых (естественных) условиях, так и при осуществлении обоих вариантов проектируемых инженерных мероприятий для различных расходов: меженном ( $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ ), руслоформирующем ( $2800 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и паводковым ( $3500 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Моделирование вариантов с большими (экстремальными паводковыми) значениями расхода потребовало бы расширения ЦМР на всю обширную (7 км в ширину) пойменную область исследуемого участка р. Обь и формирования другой матрицы высот рельефа, что привело бы к неоправданным временным затратам. Поскольку для данной территории экстремальные паводки не являются руслоформирующими, моделирование русловых процессов при больших расходах не проводилось.

Моделирование полей скоростей для разных вариантов берегоукрепительных работ и разных расходов позволили сделать вывод о локальном влиянии деформации русла на характер течения реки. Изменение поля скоростей при меженном расходе для обоих вариантов берегоукрепительных работ не превышает значения  $0,2 \text{ м/с}$  на достаточно малой площади. При руслоформирующем расходе для обоих вариантов берегоукрепительных работ изменение поля скоростей не превысит  $0,4 \text{ м/с}$  (рис. 7), однако область пониженных скоростей для второго варианта берегоукрепительных работ будет значительна.

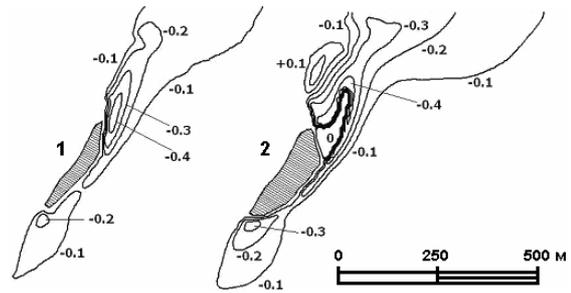


Рисунок 7 – Разница в значениях полей скорости при бытовых условиях и разных вариантах берегоукрепительных работ

По полученным полям скоростей были проведены расчеты локальных русловых деформаций. При анализе скоростей размыва/аккумуляции руслообразующих наносов р. Обь в районе строительства берегоукреплений в бытовых условиях и при реализации различных вариантов инженерной защиты берега были сделаны следующие выводы:

- в условиях межени реализация любого из двух вариантов берегоукреплений практически не оказывает влияние на естественный ход русловых деформаций;

- при руслоформирующем расходе в случае реализации варианта берегоукрепления № 1 практически не изменяется естественная направленность вертикальных русловых деформаций;

- при руслоформирующем расходе в случае реализации варианта берегоукрепления № 2 в районе устья р. Барнаулка (перед фронтом берегоукрепительного сооружения) будет усиливаться локальный размыв и, соответственно, увеличиваться зона размыва, а ниже по течению будут нарастать процессы аккумуляции;

- при паводковом расходе в случае реализации варианта берегоукрепления № 1 естественная направленность вертикальных русловых деформаций не меняется;

- при паводковом расходе в случае реализации варианта берегоукрепления № 2 перед фронтом сооружения будет усиливаться локальный размыв русла, ниже по течению у левого берега будут наблюдаться процессы заиления и, соответственно, повышаться отметки дна, можно ожидать, что стречневая зона потока в районе проектируемой берегозащиты будет более интенсивно смещаться к правому берегу.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что проведение работ для укрепления берегов оби и барнаулки по

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УЧАСТКЕ Р. ОБЬ У Г. БАРНАУЛА

варианту № 1 существенно не изменит скоростную структуру речного потока и тенденции развития современных русловых процессов на рассматриваемом участке реки в различные гидрологические сезоны. При выполнении берегоукреплений по варианту № 2 кинематическая структура речного потока может претерпеть качественные изменения, в результате чего изменятся условия взаимодействия потока и русла. Так, у левого берега ниже по течению будет формироваться циркуляционная зона. В результате этого на данном участке русла усилятся процессы аккумуляции и повысятся отметки дна. Перед фронтом сооружения возникнет область локального размыва русла. Возможно усиление процесса отклонения стрежневой зоны речного потока вправо из-за усиления размыва русла у правого берега. Эти локальные изменения протекания руслового процесса не отвечают требованиям хозяйственной деятельности на рассматриваемом участке реки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект № 5752) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 05-05-98012-р\_Обь).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробкова Г.В. Обь // Барнаул: Энциклопедия. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2000а. – С. 208-209.
2. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. – М., Изд-во МГУ, 1979. – 234 с.

3. Зиновьев А.Т., Марусин К.В., Шлычков В.А., Затинацкий М.В. Численное моделирование динамики речного потока на участке размываемого русла // Материалы VIII Всероссийской конференции "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф", 2005, Кемерово, ([www.ict.nsc.ru/ws/hazards2005/](http://www.ict.nsc.ru/ws/hazards2005/)).

4. Зиновьев А.Т., Марусин К.В., Марков А.М., Боечко К.Н. Математическое моделирование русловых процессов на участке р. Обь для выбора инженерных мероприятий по расчистке русла // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям науки и техники. Ч.2. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 178-181.

5. Engelund F., Hansen E. A monograph on Sediment transport In Alluvial Streams // Nordic Hydrology. – No 7. – 1967.

6. Van Rijn Leo C. Sediment transport by Currents and Waves. The Handbook. – Delft Hydraulics, 1989. – 360 p.

7. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.

8. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды // ЖВМиМФ. – 1997. – Т. 37. – № 8. – С. 1006-1019.

9. Зубкова К.М. Формирование и баланс взвешенных наносов р.Оби на участке от г. Барнаула до г. Камень-на-Оби // Труды ГГИ. – 1991. – Вып. 349. – С. 30-46.

10. Зиновьев А.Т., Марков А.М., Шибких А.А., Котовщиков А.В. Построение цифровой модели рельефа русла р. Катунь для математического моделирования русловых процессов // Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям науки и техники. Ч.2 – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 176-178.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ АТМОСФЕРНЫМИ ВЫБРОСАМИ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО РЕГИОНА

А.А. Быков, Е.Л. Счастливец, С.Г. Пушкин, О.В. Смирнова

*В настоящей статье рассказывается о разработанной и программно реализованной в Институте угля и углехимии СО РАН локальной долгопериодной модели расчета осаждения атмосферных частиц на подстилающую поверхность. Рассматриваются возможности модели и перспективы ее применения для решения практических задач управления качеством природной среды угледобывающего региона.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Кузбасс является основным угледобывающим регионом Рос-

сии. Концентрация производства на незначительной территории является причиной очень высокой экологической нагрузки на населе-