

Шлычков Вячеслав Александрович  
Институт водных и экологических проблем СО РАН  
(Новосибирский филиал)

[slav@ad-sbras.nsc.ru](mailto:slav@ad-sbras.nsc.ru)

Численное моделирование  
вертикальной структуры течений в  
озерах и водохранилищах

- При описании гидрофизических характеристик глубокого водоема, где доминируют эффекты стратификации и вертикального перемешивания, появляется необходимость детализации вертикальной структуры потока.
- Математическая модель предназначена для расчета полей скорости, температуры, характеристик турбулентности, геометрии свободной поверхности, переноса мутности и русловой деформации, эволюции примеси в водоемах суши.
- Используются уравнения гидротермодинамики в приближении Буссинеска в гидростатическом и негидростатическом вариантах в области с произвольным донным рельефом.
- Турбулентное замыкание основано на применении 2-параметрической модели, в основу которой положены уравнения для КЭТ и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ . В т.н. LES-варианте используется  $l$ -модификация модели турбулентности для ограничения масштаба вихрей размерами элементарного бокса. Горизонтальное перемешивание описывается с помощью модели Смагоринского.
- В численной реализации применяются неявные алгоритмы с использованием консервативных схем. При интегрировании уравнений переноса используются монотонные TVD-схемы второго и третьего порядка точности.

Основные уравнения продольно-поперечного приближения получены из системы гидротермодинамики путем их осреднения по горизонтали в пределах ширины  $b$  руслового поперечника:

$$\frac{\partial bu}{\partial t} + \frac{\partial buu}{\partial x} + \frac{\partial buw}{\partial z} = -gb \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{b}{\bar{\rho}_w} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{gb}{\bar{\rho}_w} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\xi} \rho dz +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( bK_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( bK_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - F_b^{(u)},$$

$$\frac{\partial bw}{\partial t} + \frac{\partial buw}{\partial x} + \frac{\partial bww}{\partial z} = -\frac{b}{\bar{\rho}_w} \frac{\partial p}{\partial z} + g\beta_T T + \frac{\partial}{\partial x} \left( bK_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( bK_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - F_b^{(w)},$$

$$\frac{\partial bT}{\partial t} + \frac{\partial buT}{\partial x} + \frac{\partial bwT}{\partial z} = \alpha_T \left( \frac{\partial}{\partial x} bK_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} bK_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{\bar{\rho}_w c_p} \frac{\partial bR}{\partial z} + P_T,$$

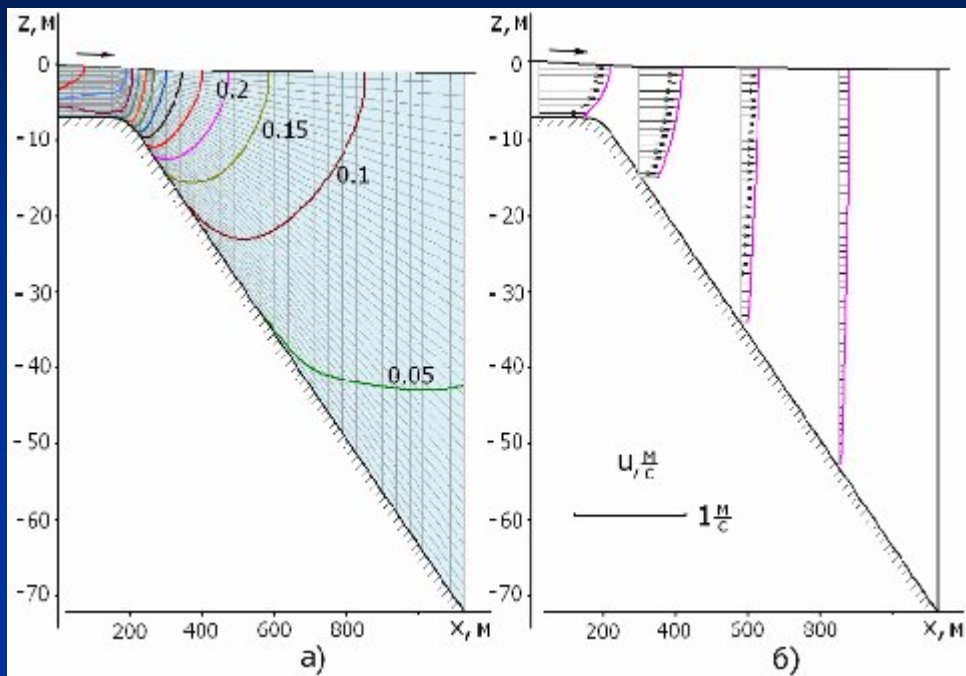
$$\frac{\partial bu}{\partial t} + \frac{\partial bw}{\partial z} = q_s$$

3D-уравнения имеют традиционный вид, используемый при моделировании бароклинного океана.

Краевые условия формулируются в соответствии с типом водообмена и характером решаемой задачи.

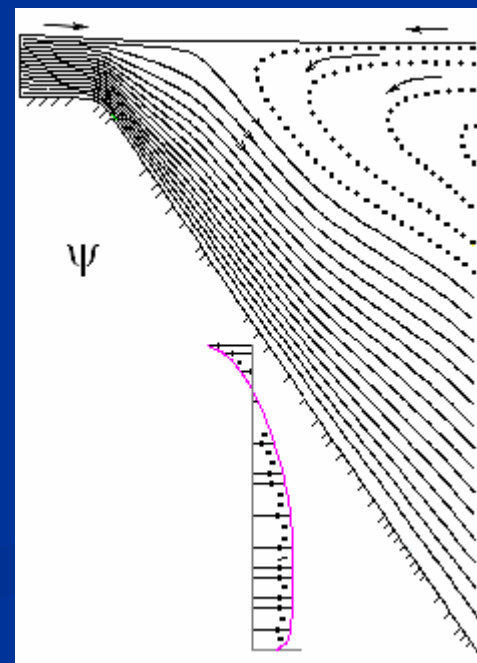
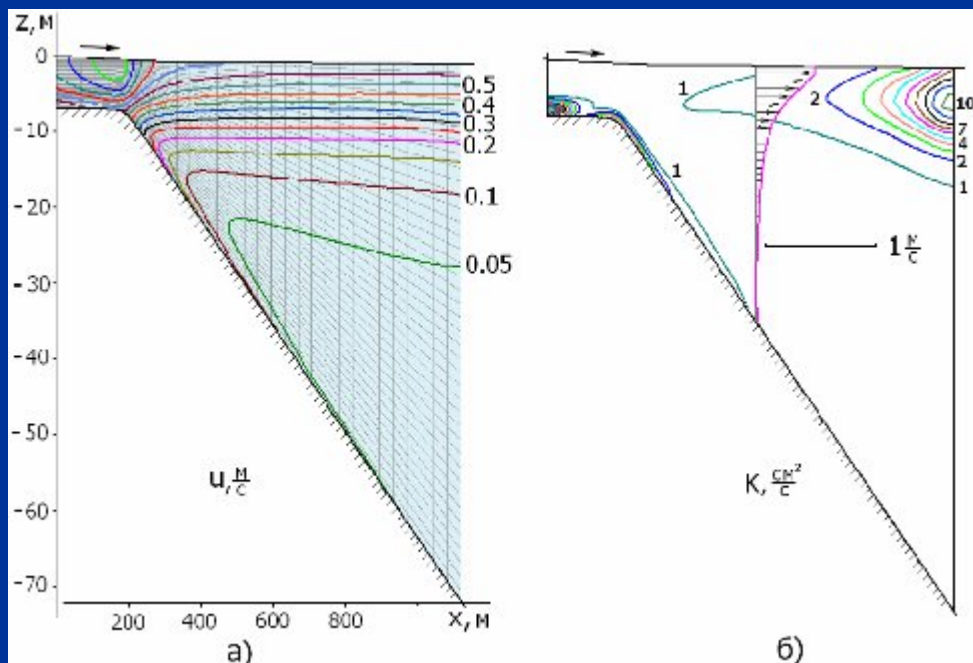
Ниже представлен ряд примеров численного описания течений с помощью гидродинамической модели.

На рисунках представлен вертикальный разрез береговой зоны Телецкого озера на участке впадения р. Чулышман - основного источника водообмена. Изолинии иллюстрируют структуру поля продольной скорости, стрелками показаны профили скорости на вертикалях.



С переходом к глубоководной части водоема скорости быстро падают и равномерно перераспределяются по глубине.

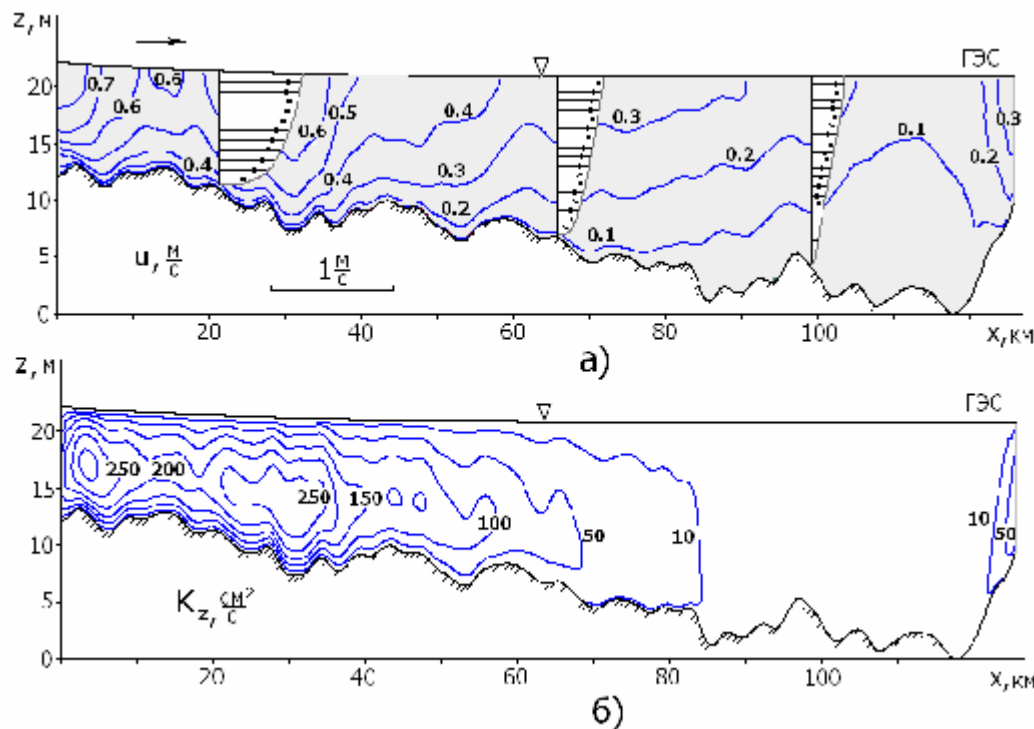
При задании устойчивой температурной стратификации вертикальный обмен в значительной степени блокируется и течение уже не захватывает глубинные слои, а формирует поверхностную струю.



Более сложный характер имеет поле скорости при встречном ветре, дующим справа налево. В этом случае в озере формируется поверхностное противотечение, а русловая струя отжимается в донные слои. Рисунок показывает линии тока.

# Численная модель взвесенесущего потока для Новосибирского водохранилища

На рисунке представлена вертикальная структура продольной скорости и коэффициента турбулентности  $K_z$  ( $\text{см}^2/\text{с}$ ) в Новосибирском водохранилище, полученными при расходе  $2000 \text{ м}^3$ .

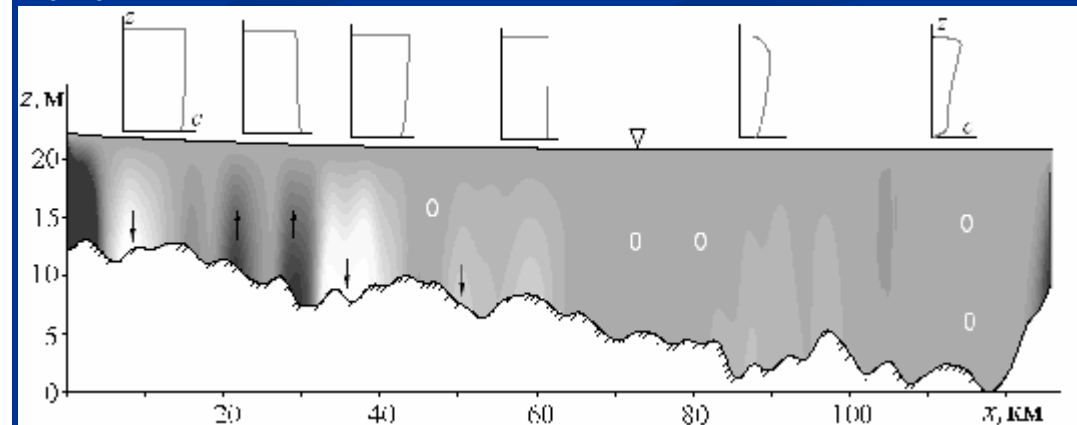


Поле скоростей использовалось в задаче изучения темпов заиления водоема за счет осаждения взвешенных наносов.

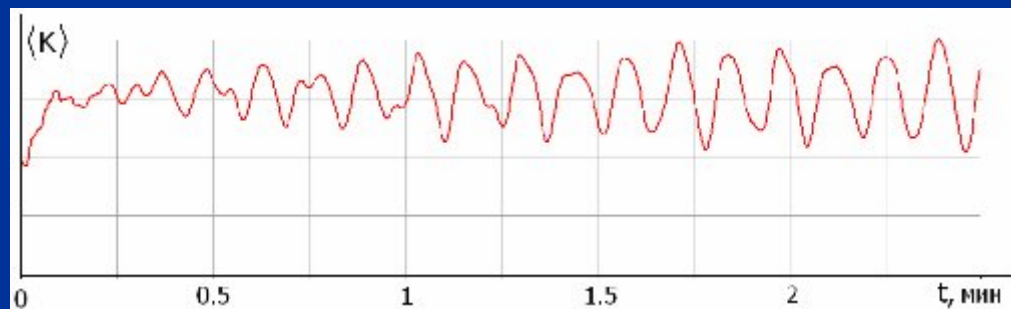
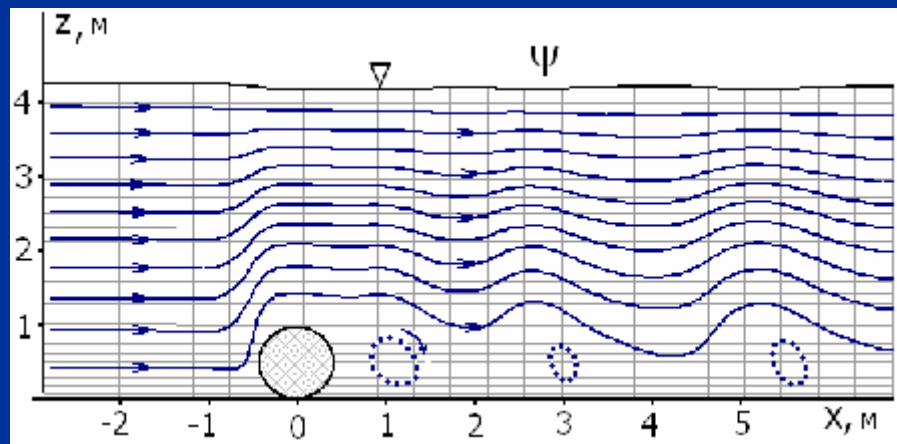
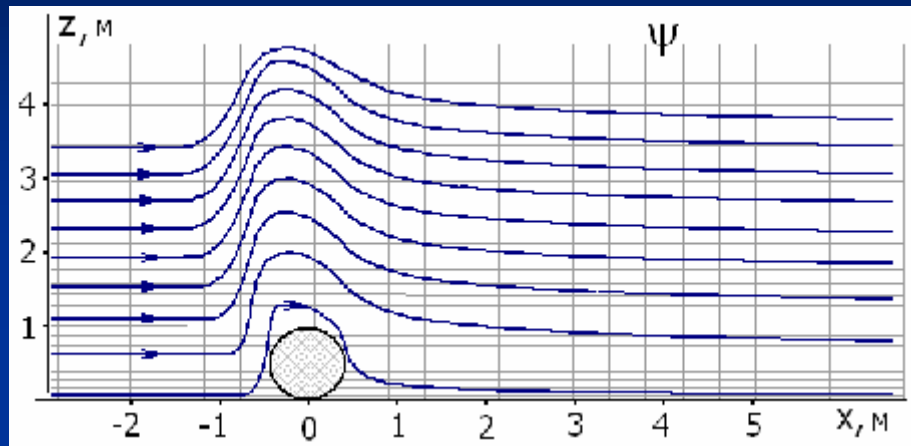
Нижний рисунок показывает структуру вертикального потока взвеси (светлые участки соответствуют осаждению, темные – взмыву) и эпюры мутности.

Потеря твердой массы в котловине верхнего бьефа при транзитном движении составляет около 85%.

Максимум скоростей аккумуляции не превышает 4 мм в год, что за 50 лет эксплуатации дает оценку приращения слоя осадков в 20 см.

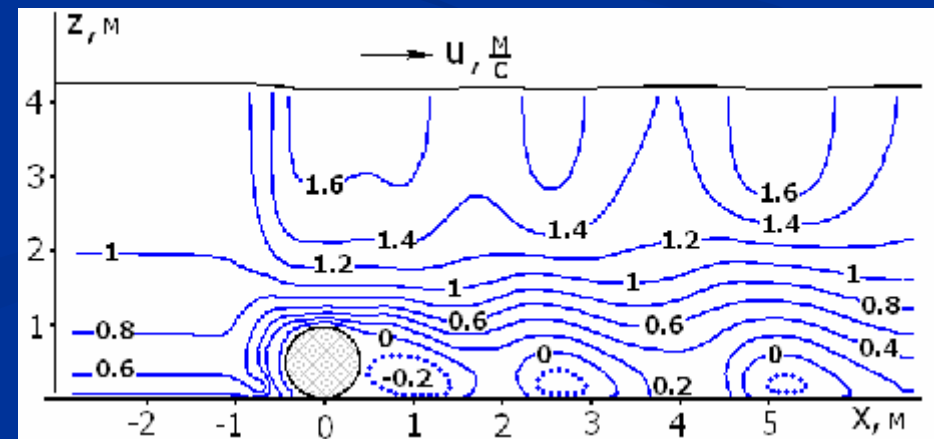


Строгая общепризнанная теория и адекватные методы расчета транспорта наносов отсутствуют, а для количественного определения твердого расхода в речных руслах используются эмпирические формулы. Модель с вертикальной детализацией течения позволяет решать задачи перемещения донных наносов, не прибегая к использованию эмпирических формул.

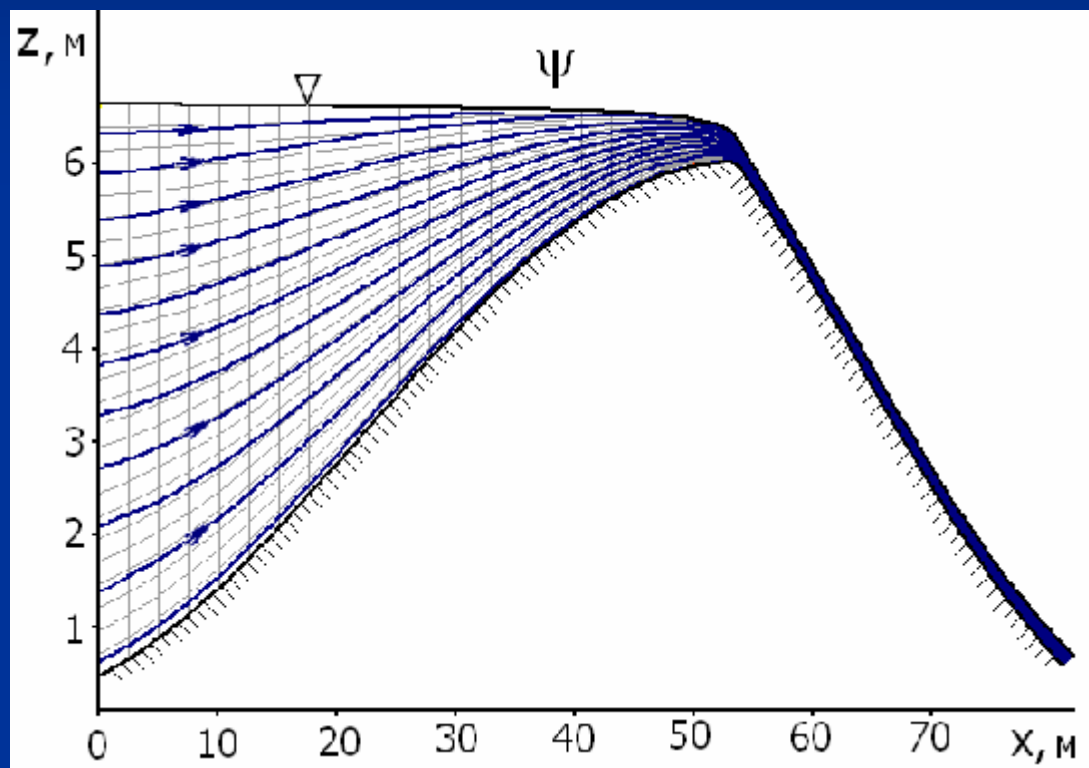


Для этих целей необходимо точно рассчитать сдвиговые напряжения на дне, т.е. построить распределение придонных скоростей.

В этом контексте рассматривается задача обтекания речным потоком дюкера  $d=1 \text{ м}$ , лежащего на дне русла. При большой глубине потока возмущения, вызванные препятствием, не достигают свободной поверхности (верхний рисунок). При глубине, сопоставимой с диаметром трубы, течение оказывается нестационарным: в тыльной части дюкера генерируются вихри, которые сносятся вниз по потоку.

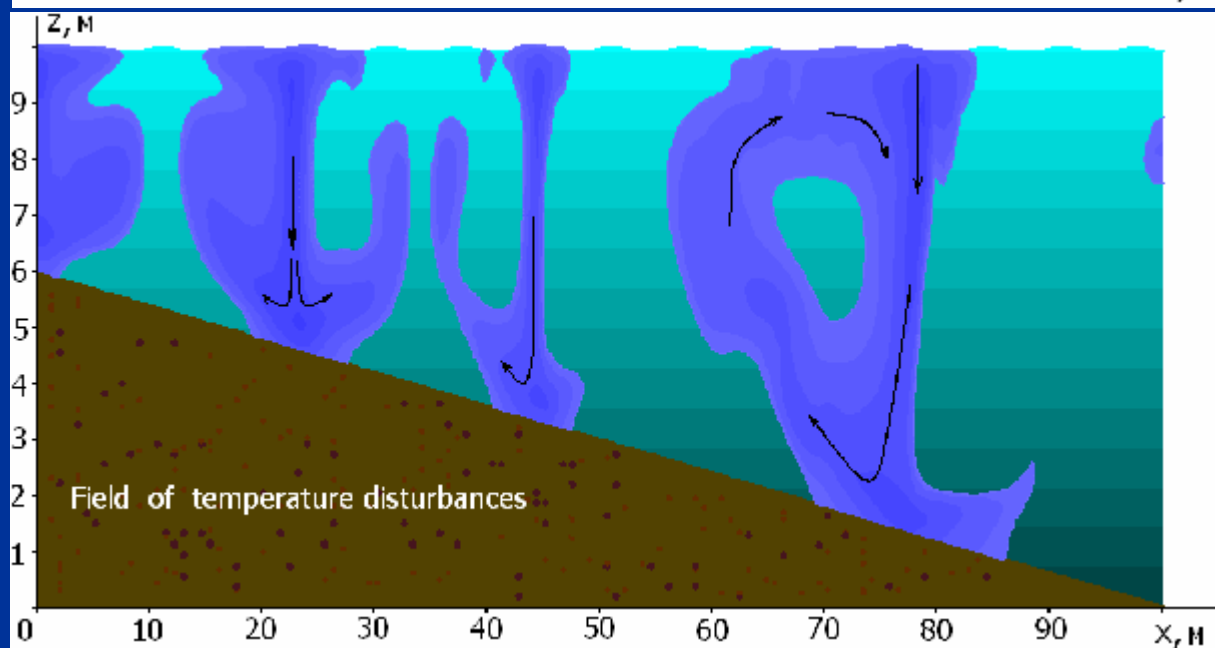
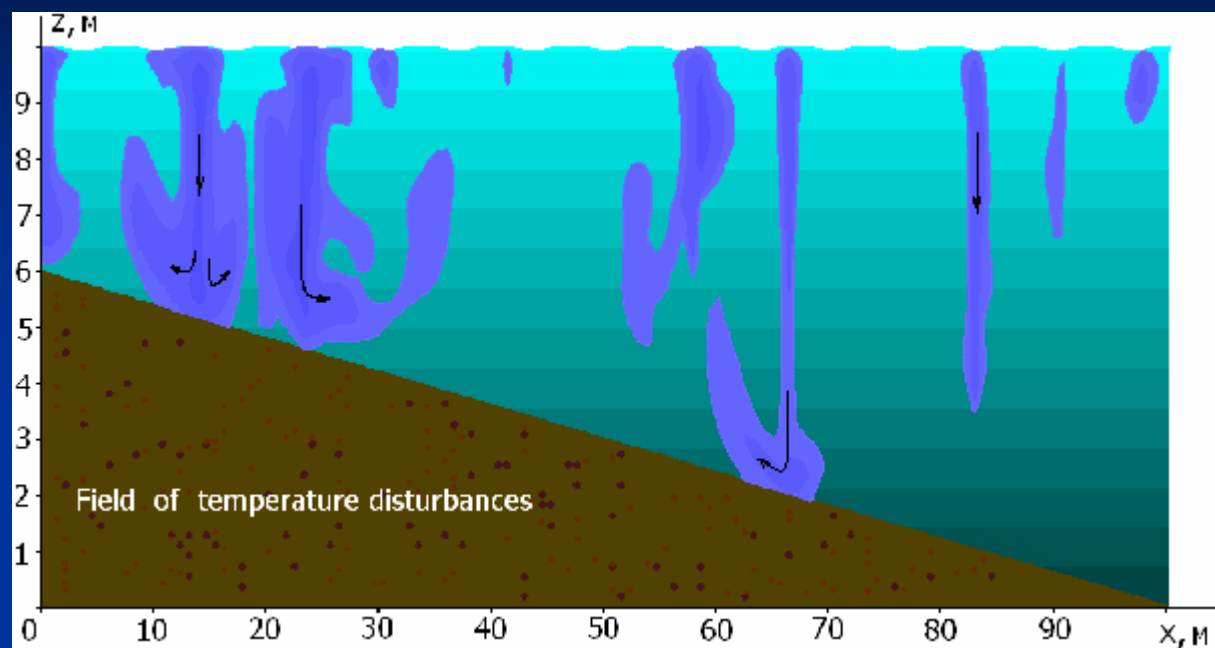


Модель позволяет решать задачи о размыве земляных плотин и дамб при аварийном повышении уровня водоема. Рисунок показывает структуру функции тока в расчетном примере.





# Вихреразрешающая модель для описания конвективного обмена в береговой зоне при выхолаживании поверхности



С понижением температуры поверхности и развитием конвективной неустойчивости в верхнем слое водоема формируется система термиков, переносящих холодные массы воды вниз. Области с нисходящими токами локализуются в узкие струи, с горизонтальными размерами 3-4 м. Динамика процесса характерна для формирования слоя перемешивания при проникающей конвекции, когда вертикальный теплообмен реализуется в виде стохастического ансамбля термиков – когерентных структур.

На рисунках показаны поля возмущений температуры на разных стадиях развития процесса. С течением времени слой перемешивания распространяется в глубину и достигает придонных горизонтов. Развиваются динамические процессы коагуляции, когда более мощные термики поглощают близко расположенные мелкие структуры и сами увеличиваются в размерах. Холодные массы перемещаются вниз и отражаются от поверхности дна, порождая дивергентное течение.



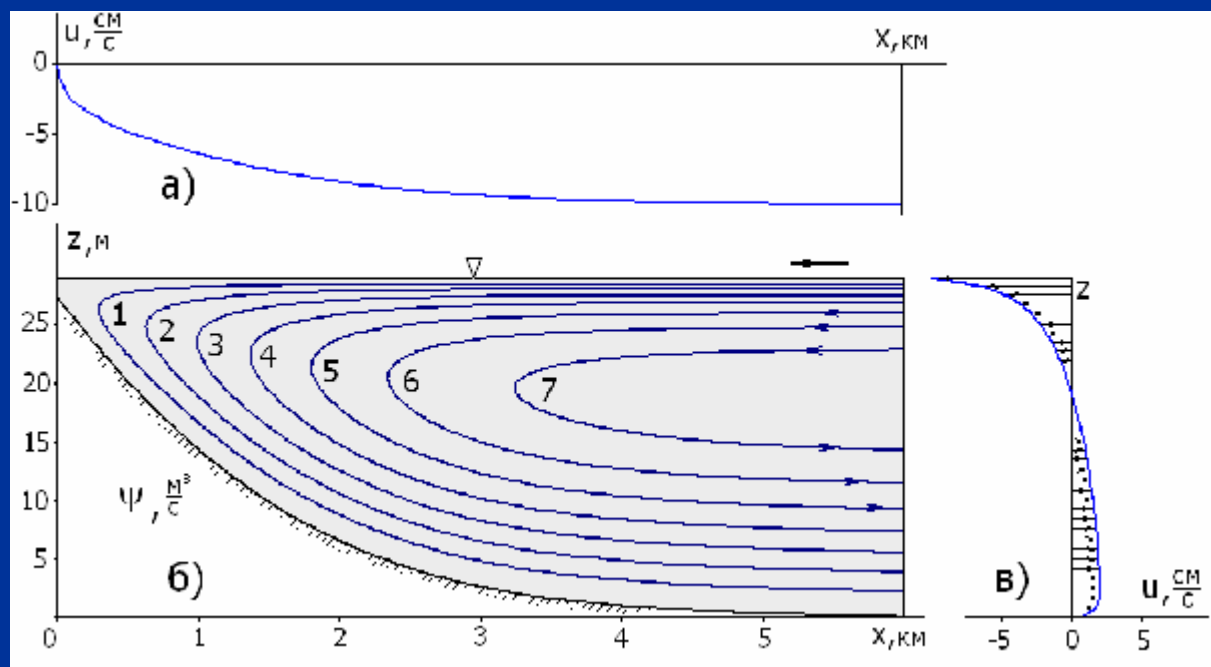
# Расчет морских ветровых течений и переноса примеси вблизи г. Сочи

В настоящее время на черноморском побережье у г. Сочи проектируется строительство подводного трубопровода для сброса городских сточных вод. Придонный водовыпуск предполагается разместить на расстоянии 4 км от линии уреза воды на глубине 30 м. Для изучения особенностей миграции загрязняющих веществ при эмиссии необходимо воспроизвести локальную структуру течения в прибрежной части моря.

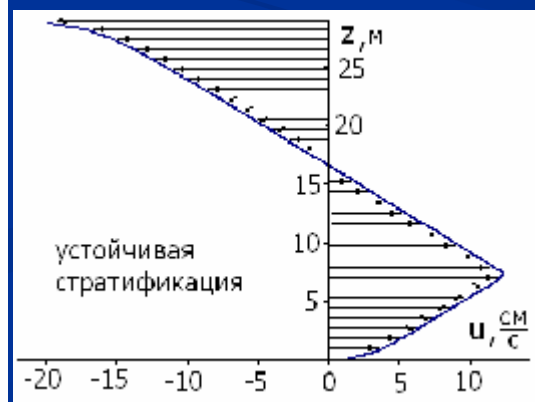
Рассматриваются течения, обусловленные поверхностными ветровыми напряжениями.

Решение задачи получено на основе двух- и трехмерного численного моделирования.

На рисунке представлена схематизация донного рельефа изучаемого участка и расчетные характеристики течения. Ветер силой 3 м/с, направленный к берегу, генерирует скорость течения около 0.1 м/с. Рисунки б), в) иллюстрируют функцию тока и вертикальный профиль продольной скорости при нейтральной стратификации.

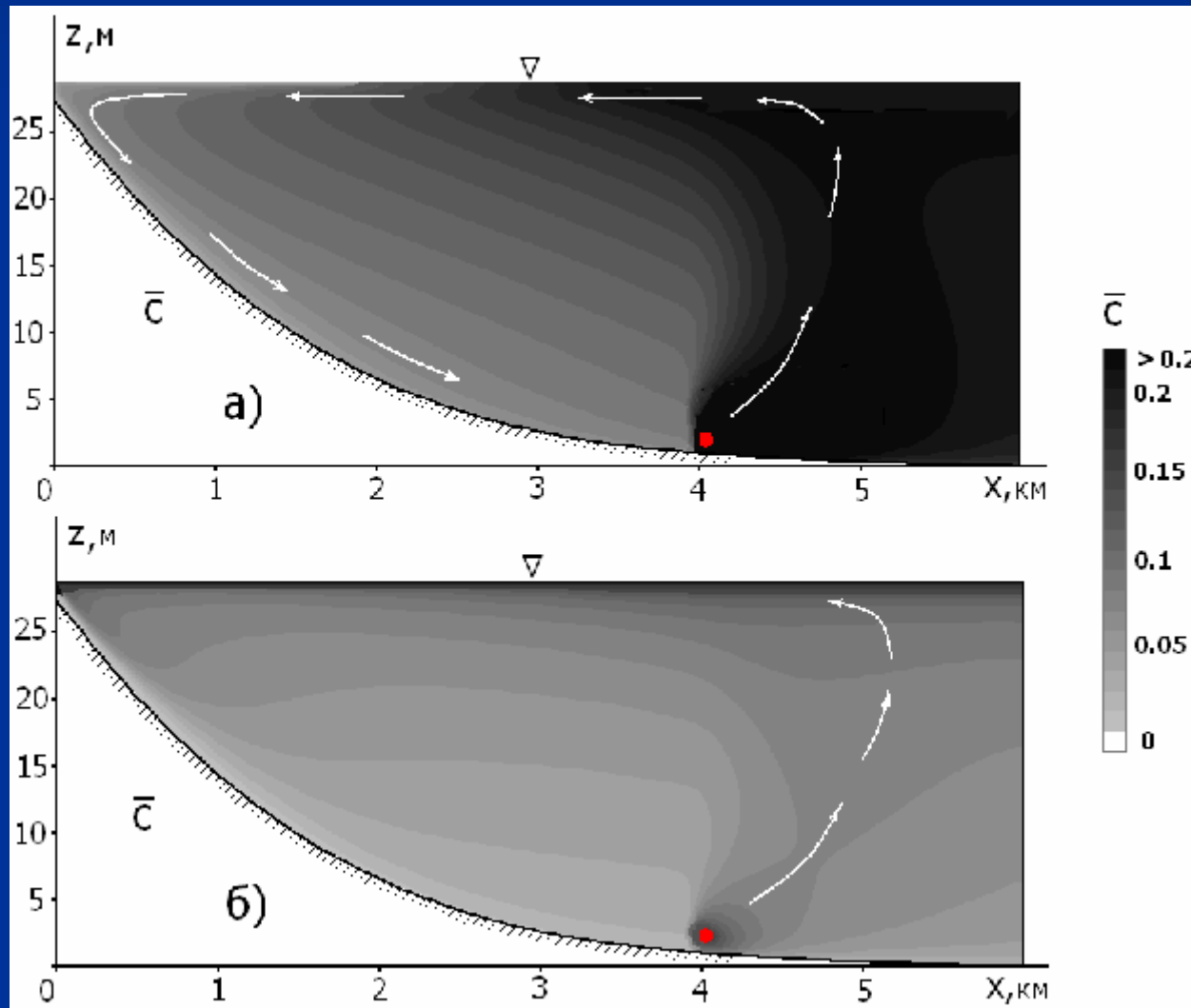


В условиях устойчивой стратификации эпюра скорости заметно меняется - при неизменном атмосферном форсинге ее поверхностная амплитуда увеличивается вдвое; соответственно возрастает скорость компенсационного придонного течения.



# Расчет морских ветровых течений и переноса примеси вблизи г. Сочи

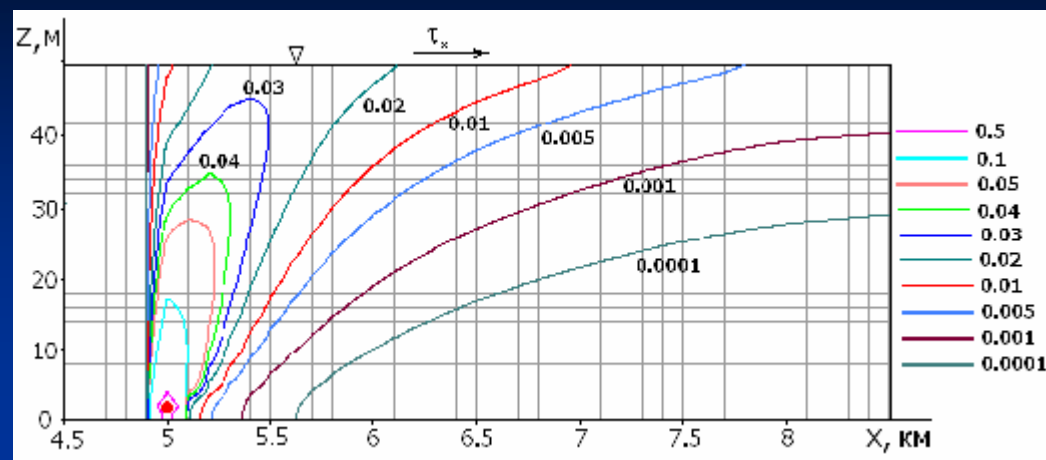
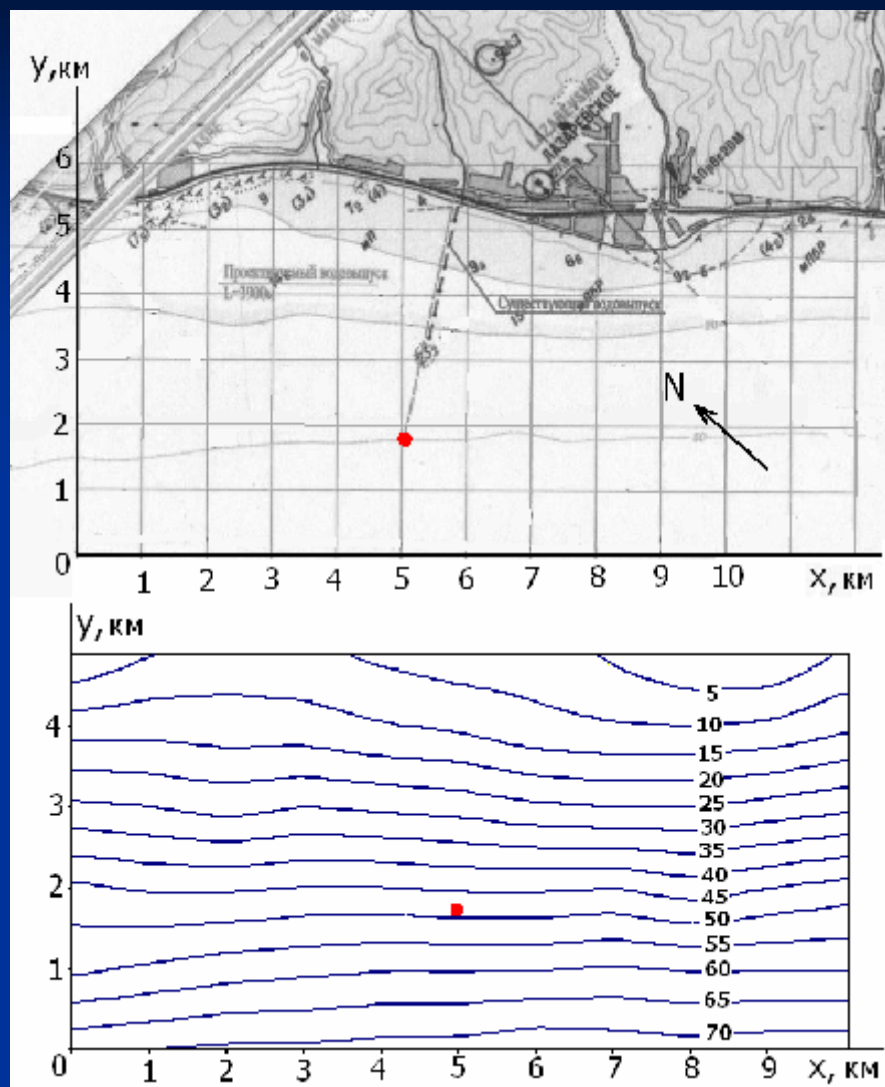
Если принять предположение о динамической пассивности сбрасываемых вод, то наиболее опасным будет поверхностное течение, направленное от берега, т.к. в этом случае обратная донная циркуляция сформирует поток загрязнителя к берегу. Однако, если учесть, что примесь имеет плотность пресной воды (меньшую минерализованной морской воды) и летнюю температуру выше, чем в придонных слоях моря, то доминирующими могут оказаться эффекты плавучести. Перераспределение примеси в этом случае будет определяться соотношением динамических и термодинамических факторов.



Верхний рисунок показывает поле нормированной концентрации с плавучестью, меньшей скорости нисходящих движений у берега. Под влиянием перепада плотности примесь от источника поднимается вверх и, следуя течению, переносится здесь к берегу. В береговой зоне примесь не задерживается, а увлекается циркуляцией ко дну, не приводя к возрастанию береговой концентрации.

Качественно другая картина получена в варианте, когда преобладают эффекты плавучести. Всплывающая примесь не вовлекается во внутреннюю циркуляцию, а остается на поверхности. Под влиянием ветрового течения она сносится к берегу и аккумулируется вблизи уреза воды, достигая значений в несколько раз больше, чем вблизи водовыпуска.

# Расчет морских ветровых течений и переноса примеси вблизи г. Сочи



С помощью трехмерной численной модели был проведен расчет параметров ветрового течения на базе реальных морфометрических и метеорологических данных. Восстановлена гидрофизическая структура потока и построена область влияния сбрасываемых загрязненных вод. Рисунок сверху отражает фрагмент области с изолиниями нормированной концентрации загрязнителя. Рисунок построен в вертикальной плоскости, проходящей через оголовок выпуска. Изолинии дают представление о характеристиках рассеяния и могут служить основой для оценки экологической нагрузки на водоем.

На рисунках показано географическое положение водовыпуска в плане и батиметрическая карта в расчетной области.