

4. Сайпулаев И.М., Эльдаров Э.М., Эфендиев И.И. Социально-экологические проблемы водохозяйственной деятельности в бассейне реки Самур // Мелиорация и водное хозяйство. 2005. №1. С. 26-28.
5. У высоких берегов Самура // Природа. 2001. 12 июля.
6. Фатуллаев Г.Ю. Современные изменения водных ресурсов и водного режима рек Южного Кавказа (в пределах Каспийского бассейна). Баку, 2002. 167 с.
7. Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 330 с.

R.A. Ismayilov

CHANGES OF WATER CONSUMPTION SAMUR RIVER FOR ITS RATIONAL USES

These studies are about the changes of water consumption at Samur River for its rational uses. Changes of the water consumption in Samur River estimated using different approaches. A long-term anthropogenic change of the annual flow of the Samur River has been studied by author. Impacts of water withdrawals to the regime of this river were analyzed.

К е у w o r d s : water consumption; annual flow; water withdrawals.

УДК 556.552

А.Б. Китаев, О.В. Ларченко

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА*

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: hydrology@psu.ru

Построен план течений в центральной и нижней частях Воткинского водохранилища с использованием материалов непосредственных измерений и способа, предложенного Н.М. Бернадским. Показана сходимость результатов.

К л ю ч е в ы е с л о в а : водохранилище; план течений; линии тока; кинематическая структура.

При проектировании гидротехнических сооружений, прудов-охладителей, судоходных трасс и различных мероприятий по улучшению судоходных условий рек часто возникают вопросы, связанные с оценкой кинематической структуры потока. Поскольку проектируемые сооружения вызывают изменение плана течений, появляется необходимость прогноза русловых деформаций в месте их создания.

Течения внутренних водоемов представляют собой перемещения водной массы, обусловленные действием различных факторов. К ним относят гидрометеорологические факторы (приток речных вод и сток их через створ гидросооружения, ветер, плотностная неоднородность, изменение атмосферного давления и др.), морфометрию водоема, рельеф дна, турбулентное перемешивание, термический режим.

Изучению течений в водоемах посвящено немало работ, среди которых следует отметить труды Т.Н. Филатовой, обобщившей существующие представления об основных видах течений, возникающих во внутренних водоемах, на основе которых была предложена одна из самых удачных классификаций течений. Кроме этого, исследованием течений в свое время занимались такие ученые, как Н.В. Буторин, А.С. Литвинов, А.С. Судольский, П.Ф. Чигиринский, Л.Я. Кулиш, Ю.И. Подлипский, Е.А. Шмелева, И.Ф. Фомичев, В.М. Широков, Н.С. Лопух, А.В. Караушев и др. Изучению течений на Камских водохранилищах посвящены труды Ю.М. Матарзина, И.К. Мацкевича, Л.И. Дубровина, И.В. Кошмякова и Т.П. Девятковой.

Наиболее полной и подробной классификацией, отражающей специфику течений водохранилищ, является классификация Т.Н. Филатовой [4]. Согласно этой классификации течения внутренних водоемов делятся на две основные группы. В первую группу входят течения, наблюдаемые по всей

акватории водоема, в том числе и в прибрежной зоне; во вторую — течения, развивающиеся только в прибрежной зоне. Наибольший интерес представляют течения первой группы, к которым относятся стоковые, проточные, ветровые, волновые, плотностные, бароградиентные, сейшевые, внутриволновые и инерционные.

На камских водохранилищах наблюдаются практически все виды течений, имеющие место в искусственных водоемах.

Основной задачей настоящего исследования является построение *плана линий тока* (или *плана течений*), позволяющего представить структуру течений, их прямолинейность или извилистость.

В настоящее время существует три способа построения плана течений: 1) по данным натурных наблюдений, 2) теоретические методы, 3) моделирование.

1. Наличие материалов измерений расходов в нескольких профилях, близко расположенных друг к другу, предполагает построение *натурного плана течений*. Такой метод построения плана течений называется *гидрометрическим*.

2. *Теоретические методы* построения плана течений включают несколько способов: способ Н.М. Бернадского, расчет течений методом интегральных кривых, расчет поля скоростей Н.А. Давтян, динамический метод, метод полных потоков В.Б. Штокмана, метод плоских сечений (предложен М.А. Великановым, но, по сути, является модификацией метода Бернадского, основанной на пренебрежении силами инерции), метод фрагментов.

3. *Моделирование*. Этот способ решения задачи основан на приближенном интегрировании уравнения движения методом электрогидродинамической аналогии – ЭГДА, так как математическим аналогом движения потока жидкости является движение электрического тока в проводящей среде. ЭГДА – метод исследования течений идеальной жидкости путём изучения движения электрического тока в проводнике. Суть метода заключается в том, что потенциал скорости и функция тока идеальной жидкости, с одной стороны, и скалярный потенциал электрического поля и функция тока электрического поля, с другой стороны, являются решениями уравнения Лапласа. При использовании прямой ЭГДА напряжённость электрического поля моделирует гидродинамический потенциал, а гидродинамическая функция тока соответствует электродинамической функции тока. В методе прямой ЭГДА исследуемая модель выполняется из диэлектрика, что позволяет реализовать на её поверхности граничное условие непротекания.

Этот метод может применяться в тех случаях, когда изменение глубины по сечению не велико и им можно пренебречь.

Метод ЭГДА ранее применялся для построения плана проточного течения Камского водохранилища И.В. Кошмяковым и Т.П. Девятковой [3].

Для построения плана течений гидрометрическим и теоретическим способом в качестве объекта исследования выбрано Воткинское водохранилище, что обусловлено меньшим ветровым воздействием на его водную массу по сравнению с Камским. Поскольку на Воткинском водохранилище наиболее развиты проточные течения, а ветровые течения наблюдаются в основном в наиболее широкой приплотинной части водоема, построенный план отражает, прежде всего, картину проточных течений.

Для построения плана течений I района Воткинского водохранилища выбраны два способа построения плана течений: по данным натурных наблюдений и теоретический метод – метод Н.М. Бернадского. Выбор метода Н.М. Бернадского для построения плана течений обусловлен двумя обстоятельствами: 1) этот метод лежит в основе ряда других теоретических методов [2], 2) наличием необходимых данных для расчета. Основным критерием для выбора участков построения планов течений является наличие исходных для конкретного метода материалов.

Построение плана течений по данным натурных наблюдений I района Воткинского водохранилища

Наличие материалов измерений расходов в нескольких створах, близко расположенных друг к другу, предполагает построение *натурного плана течений* (рис.1). Построение этого плана течений для исследуемого I района Воткинского водохранилища производилось на конец октября маловодного (1967) и начало сентября года близкого по водности к среднему (1964).

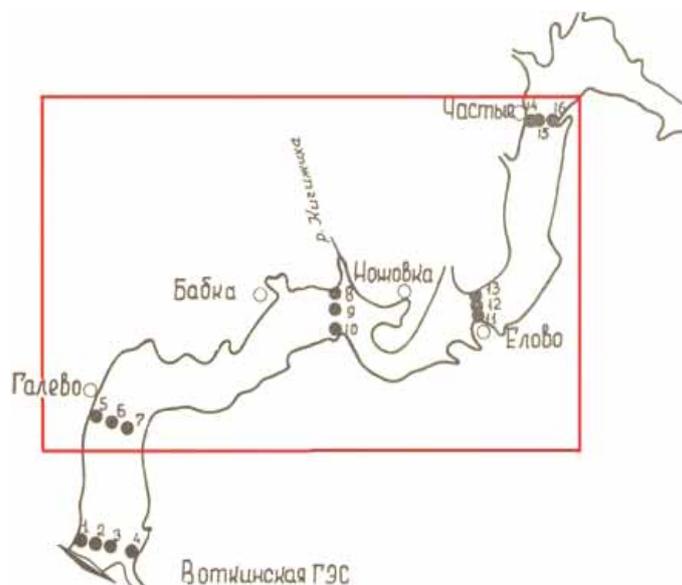


Рис. 1. Схема расположения скоростных вертикалей I района Воткинского водохранилища

Используя эпюры элементарных расходов $q = VH = \varphi(z)$, где V – средняя скорость на вертикали, H – глубина вертикали, z – ширина, для каждого профиля строится интегральный график расхода, показывающий приращение расхода при движении от одного берега к другому. Ордината интегрального графика расхода у одного берега равна нулю, а у другого — полному расходу Q . Интегральные графики позволяют осуществить разбивку полного расхода на любое количество струй с расходами δQ и установить на профиле границы между этими струями (рис.2). Эпюры элементарных расходов в программе КОМПАС – 3D V9 построены для каждого створа. По данным эпюрам для каждого профиля строится интегральный график расхода, который позволяет осуществить разбивку полного расхода на любое количество струй.

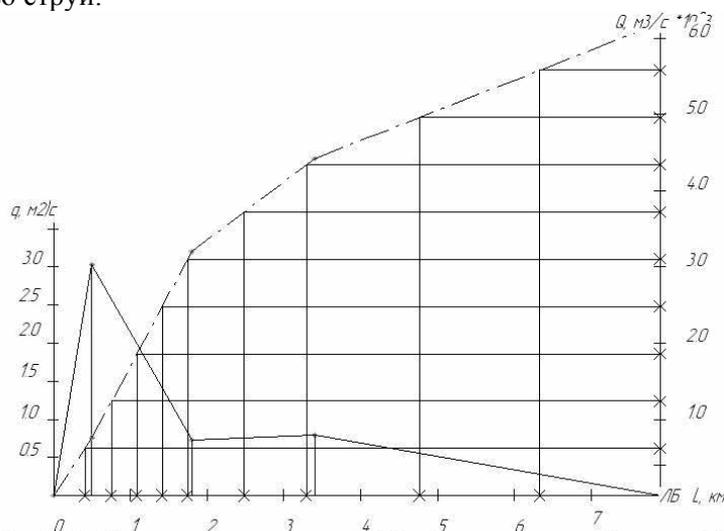


Рис. 2. Эпюра элементарных расходов и интегральная кривая расходов. Разделение интегральной кривой расхода на транзитные струи в створе с. Галево, 1964 г.

Интегрирование графика $q(z)$ в пределах от $z=0$ до $z=B$ (B – ширина реки) дает полный расход Q в створе, т. е.

$$Q = \int_0^B q(z) dz . \quad (1)$$

Если требуется представить течения в виде m струй, то Q делится на m частей и на каждом поперечнике потока (на котором измерен расход) отыскиваются границы между струями, т. е. некоторые точки z_1, z_2, z_{m-1} . Точки $z=0$ и $z=B$ — урезы противоположных берегов. Положение линий тока переносится со всех поперечников на план реки, далее производится вычерчивание линий тока на плане участка (рис. 3).

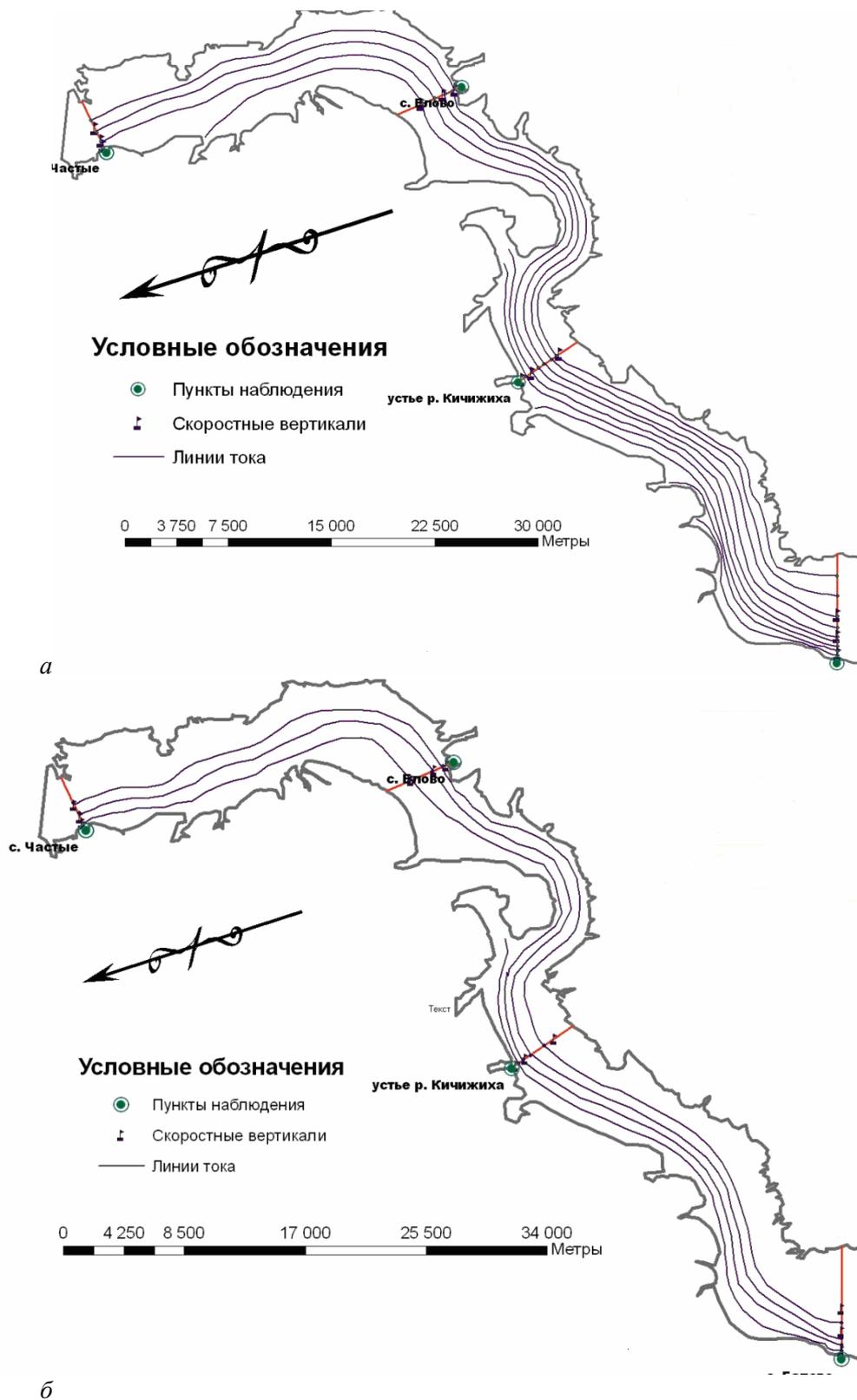


Рис. 3. План течений 1 района Воткинского водохранилища за средний по водности год *а* и маловодный год *б*

Согласно результатам построения зоны конвергенции и дивергенции струй, а значит, и зоны увеличения и уменьшения скоростей, в разные года наблюдаются в одних и тех же районах. Количество струй на плане за 1967 г. значительно меньше, чем за 1964 г., что, в свою очередь объясняется, во-первых, водностью года, а во-вторых, тем, что в 1964 г. водохранилище находилось на стадии заполнения, что существенно отразилось на скоростном режиме водоема. Кроме этого, отметим, что большие скорости наблюдаются преимущественно ближе к правому берегу.

Построение плана течений методом Н.М. Бернадского

При отсутствии данных о распределении скоростей и расходов на участке водного объекта, но при наличии батиметрической карты русла и известном полном расходе может быть выполнено построение плана теоретическим способом [2]. В основе метода Бернадского лежат динамические уравнения, составленные для транзитной струи (уравнения равновесия), и условия, учитывающие взаимодействие между струями.

Если на плане течений перпендикулярно криволинейным линиям тока и урезам провести криволинейные поперечники, то получим ортогональную решетку. Основной формулой для расчета является «правило рисунка», которое выражает связь между отношением длины клетки l ортогональной решетки к ее ширине b :

$$K = K_0 \hat{h}^{1,67} \frac{1}{\tilde{n}}, \quad (2)$$

где \hat{h} - относительная глубина, равная $\hat{h} = \frac{h}{h_0}$; h_0 - глубина начальной струи; $K_0 = \frac{l}{b}$, \tilde{n} - коэффициент шероховатости.

При отсутствии данных о распределении коэффициентов шероховатости принимают $\tilde{n}=1$ и пользуются расчетной зависимостью

$$K = K_0 \hat{h}^{1,67}. \quad (3)$$

В начале рассматриваемого участка назначают ортогональный поперечник, который располагают нормально урезам «0», далее намечают первый расчетный поперечник «1». Затем по изобатам строят профиль первого поперечника и приступают к расчету.

Необходимо разделить поперечное сечение вертикальными линиями на струи; деление выполняется произвольно. Затем находят средние глубины струй и, приняв одну из струй за начальную, вычисляют относительные глубины \hat{h} , а также назначают величину K_0 для начальной струи (удобно принимать K_0 равным целым числом). Далее для всех струй находим значение l , т. е. средние в пределах струи расстояния между ортогональными поперечниками. От начального ортогонального поперечника откладываем найденные значения l и смотрим, можно ли через изображенные на плане концы отрезков l провести следующий ортогональный поперечник. Если это невозможно, то первоначальная разбивка на струи была выполнена неверно и необходимо повторить расчет. Если вариант расчета дает хороший результат, его считают окончательным и выполняют такой же расчет для последующих поперечников.

Таким образом, расчет ведется методом последовательных приближений. Профили ортогональных поперечников построены по Атласу единой глубоководной системы Европейской части РФ [1].

С использованием метода Н.М. Бернадского выполнено построение плана течений центральной части I района Воткинского водохранилища за маловодный и средний по водности годы.

Среднее значение уровня воды за средний по водности год в сентябре ниже отметки НПУ на 11 см, что, как показали расчеты, не оказывает существенного влияния на очертания линий тока; за маловодный год уровень воды соответствует отметке 88,5 м абс, данное значение уровня на полметра ниже НПГ Воткинского водохранилища, следовательно, при построении плана течений за маловодный год необходимо отметки глубин, снятые с Атласа единой глубоководной системы [1], приводить к соответствующему уровню воды.

Анализ рис. 4 свидетельствует о том, что за разные по водности года линии тока практически не меняют свое расположение и тяготеют к правому берегу водоема, где наблюдаются наибольшие скорости течения.

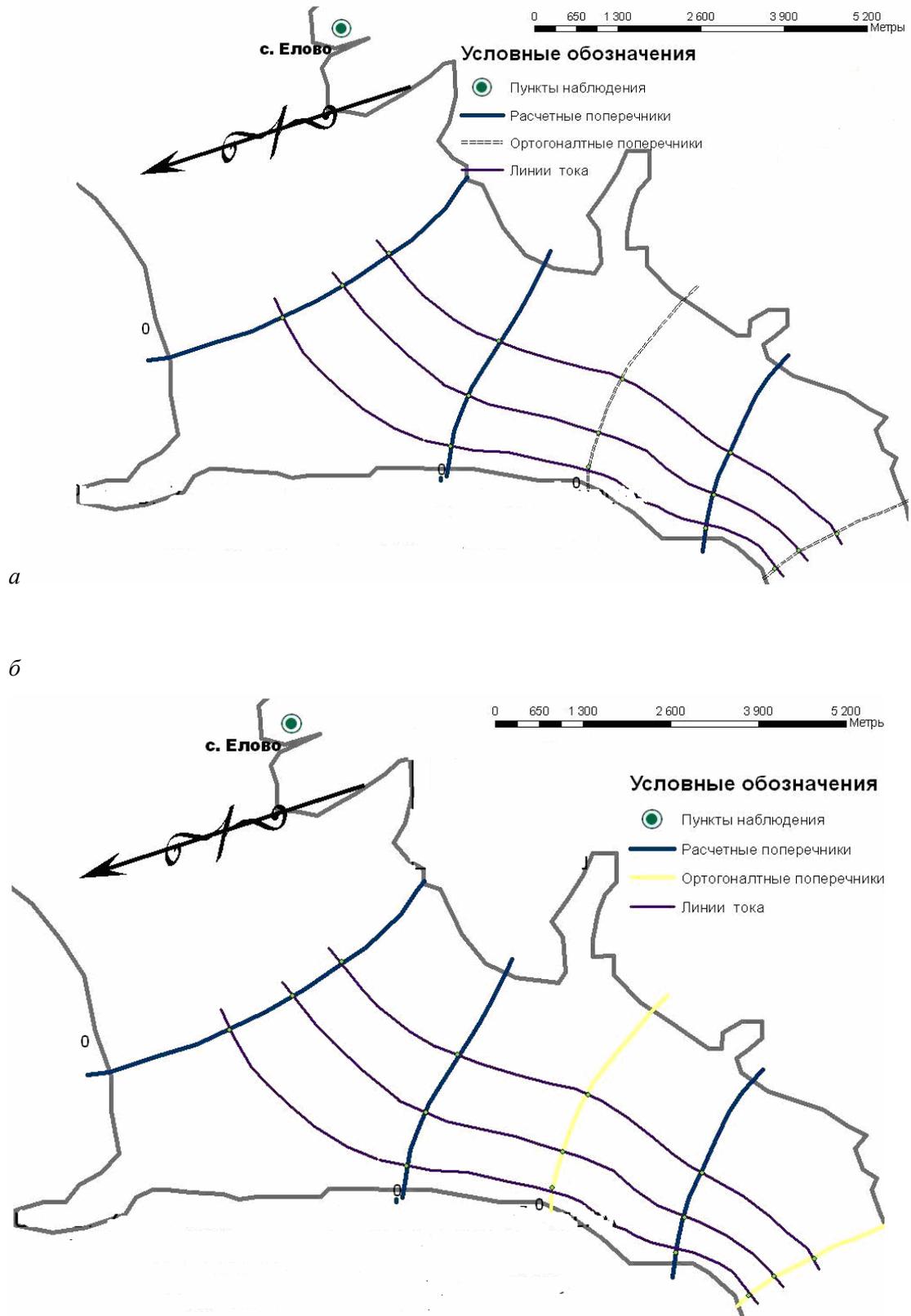


Рис. 4. План течений центральной части 1 района Воткинского водохранилища, построенный по методу Бернадского, за средний по водности *а* и маловодный *б* года

Сопоставление полученных результатов и основные выводы

В статье рассмотрены основные способы построения планов течений. Некоторые методы построения, по сути, являются той или иной модификацией метода Н.М. Бернадского, одного из самых первых теоретических методов построения плана течений. В связи с данным обстоятельством, а также с наличием минимально необходимых исходных данных было принято решение производить расчет данным методом.

При построении планов течений возникли следующие трудности:

- при расчете по данным натурных наблюдений возникают трудности, связанные с ограниченным количеством непосредственных измерений на водоемах;
- при расчете методом Н. М. Бернадского трудность состоит в ограниченности исходных данных (отсутствие сведений о коэффициенте шероховатости, поперечном уклоне водной поверхности, что влечет за собой упрощение расчетного выражения и, как следствие, построение приближенного плана течений).

Планы течений построены для I района Воткинского водохранилища по данным натурных наблюдений и теоретическим методом. Согласно полученным результатам внутри каждого метода линии тока за различные по водности года меняют свои очертания незначительно; зоны конвергенции и дивергенции струй, а значит, и зоны увеличения и уменьшения скоростей наблюдаются в одних и тех же районах. Большие скорости наблюдаются ближе к правому берегу, где встречаются наибольшие глубины. Тот факт, что сгущение линий тока происходит над наиболее глубокими частями водоемов, которым соответствуют старые затопленные русла рек, подтверждает специальные исследования скоростного режима проточных течений, проведенные в акваториях Камского, Рыбинского, Новосибирского водохранилищ [3].

На Воткинском водохранилище вследствие меньшего влияния ветра на скорости течения планы течений, построенные теоретическим методом и по натурным наблюдениям на рассматриваемом участке за маловодный год, практически не отличаются. План течений по данным непосредственных измерений скоростей на Воткинском водохранилище построен за средний по водности 1964 г., когда водохранилище еще находилось на стадии заполнения, что существенно отразилось на скоростном режиме водоема, вследствие чего планы течений, построенные методом Н. М. Бернадского и по данным натурных наблюдений, различаются.

На водохранилищах, схожих по морфометрии с Воткинским, наиболее достоверные результаты получатся при построении плана течений методом Бернадского особенно за маловодный год, когда рельеф дна оказывает большее влияние на поле скоростей, которое практически никак не учитывается при построении плана течений по данным натурных наблюдений. Построенные планы течений дают приближенное представление о распределении скоростей в потоке. При наличии данных о коэффициенте шероховатости, поперечном уклоне водной поверхности можно вычислить поправочный множитель в целях уточнения ортогональной решетки.

Библиографический список

1. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Т. 9. Ч. 1. Река Кама. От поселка Керчевский до города Чайковский. Пермь: Камское бассейновое управление пути, 1984. 37 с.
2. Гришанин К.В. Динамика русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 312 с.
3. Кошмяков И.В., Девяткова Т.П. О построении плана проточных течений камских водохранилищ // Закономерности формирования, методы расчетов водных и климатических ресурсов. Пермь, 1982. С.37-47.
4. Филатова Т.Н. Исследование течений в озерах и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 319 с.

А.В.Китаев, О.В.Ларченко

APPLICATION OF DIFFERENT METHODS FOR THE ASSESSMENT OF KINEMATIC STRUCTURE OF THE VOTKINSK RESERVOIR

The plan of currents in the central and bottom parts of the Votkinsk reservoir with use of materials of direct measurements and a way offered by N.M. Berndasky is constructed. Convergence of results is shown.

К е у в о р д с : reservoir; plan of currents; current lines; kinematic structure.