

МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ФОРМИРОВАНИЯ ФОСФОРНОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОСБОРЕ ПСКОВСКО-ЧУДСКОГО ОЗЕРА

Эвтрофикация поверхностных вод суши — одно из следствий перестройки круговоротов основных биогенных элементов в масштабах всей планеты. До XIX века круговороты азота и фосфора были практически замкнуты на суше, так как естественный сток в Мировой океан составлял лишь незначительную долю вовлеченных в круговороты количеств биогенных элементов. К настоящему времени произошли радикальные изменения в этой области вследствие широкого применения минеральных удобрений, высокой степени концентрации (до сотен тысяч животных) в современных животноводческих комплексах и высокого уровня урбанизации. По оценкам О. А. Алекина (1974) и И. С. Коплан-Дикса (1980), количество фосфора в планетарном круговороте увеличилось по сравнению с началом XIX века в 5 раз, а вынос в Мировой океан — в 40 раз. Изменилась и доля выносимого в воду фосфора с 10 до 40%. Значительная часть смыва проходит через водотоки и водоемы. Как следствие этого — ускоренная эвтрофикация малых и больших озер, которая наряду с антропогенным загрязнением создает уже проблему недостатка питьевой воды в некоторых районах мира.

Трудно переоценить значение Псковско-Чудского озера для рыбного хозяйства, энергетики, водоснабжения и рекреации. Вместе с тем анализ состояния экосистемы озера свидетельствует о том, что степень трофности его уже превышает оптимальный уровень. Озеро относят к эвтрофному типу с некоторыми мезотрофными чертами. По результатам исследования состояния озера, уже полученным в ходе выполнения Комплексной программы ГКНТ по изучению Псковско-Чудского озера, выяснено, что наиболее серьезную опасность экосистеме представляет антропогенное эвтрофирование в результате интенсивного нарастания биогенной нагрузки (Симм, 1987; Lindpere и др., 1987). Стоит отметить, что в связи с ожидаемым циклом маловодных годов явления эвтрофикации (даже при сохранении существующего уровня биогенной нагрузки) могут проявляться значительно интенсивнее и с более серьезными последствиями.

Поскольку уровень трофности определяется в первую очередь поступлением избыточных количеств общего фосфора, как лимитирующего элемента, было бы весьма желательно проанализировать структуру фосфорной нагрузки в сфере хозяйственной деятельности на водосборе и возможности ее регулирования. Воздействуя на потоки биогенов, определяющие процесс антропогенной эвтрофикации, можно предотвратить развитие нежелательных явлений. Несомненно, управлению процессом формирования антропогенной нагрузки способствовало бы решение следующих взаимосвязанных задач:

- 1) установление критического уровня фосфорной нагрузки,
- 2) имитационное моделирование пространственно-временной динамики формирования фосфорной нагрузки на водосборе с целью прогнозирования и управления потоками,

3) экономическая оценка модельных сценариев развития (как совокупностей мероприятий) и выбор наиболее предпочтительных для выхода на желаемый уровень нагрузки.

Аналогичные задачи ставились при моделировании потоков фосфора на водосборе Ладожского озера (Иванищев и др., 1984).

Предельно допустимый уровень поступления общего фосфора как лимитирующего биогена можно определить с помощью количественной меры уровня трофии Фолленвайдера (Vollenweider, 1968):

$$L_{P_{cr}} = [P]_{cr} \cdot \frac{\bar{z}}{\tau_w} (1 + \sqrt{\tau_w}),$$

где $L_{P_{cr}}$ — критическая фосфорная нагрузка, г P/м²·год; $[P]_{cr}$ — критическая концентрация фосфора при весеннем перемешивании, мг/л; \bar{z} — средняя глубина озера, м; τ_w — время полного водообмена, год.

Для расчетов примем, что критическая концентрация фосфора при весеннем перемешивании равна 0,025 мг/л, средняя глубина озера 6,95 м. Поскольку средний объем воды в озере 24,78 км³, а среднегодовой приток воды 12,46 км³/год, время полного водообмена можно принять равным 2 годам. В результате расчетов получим, что для Псковско-Чудского озера критическая фосфорная нагрузка по Фолленвайдеру составляет 0,21 г P/м²·год, что соответствует поступлению с водосбора 749 т общего фосфора в год.

Сравним эту критическую нагрузку с реальной фосфорной нагрузкой на озеро. По данным Т. Райа (Raia и др., 1987), среднегодовое поступление общего фосфора за период 1982—85 гг. только по р. Великой и основным водотокам эстонской части водосбора составляло более 400 т/год. Такого же порядка и наша оценка по минеральному фосфору на основе средней концентрации в устьях рек за 1970—1985 гг., составляющая 390—430 т P-PO₄/год. Следует отметить, что, по всей вероятности, реальная нагрузка в настоящее время еще больше, так как эти оценки занижены, поскольку частота наблюдений в пик половодья недостаточна. Во всяком случае, сравнение критической и реальной нагрузки свидетельствует о том, что для безотлагательного принятия мер желательно иметь как можно более точное представление о структуре формирования биогенной нагрузки на водосборе.

Целостная картина о распределении фосфорной нагрузки между отраслями хозяйственной деятельности и о ее временной динамике отсутствует. По нашему мнению, ее можно будет воссоздать с помощью имитационной модели. Известно, что формирование нагрузки происходит как от точечных, так и от диффузных источников. Значительные размеры водосборного бассейна предопределяют здесь отражение следующих общих закономерностей и тенденций в образовании антропогенных потоков фосфора:

- значительный вклад в фосфорную нагрузку животноводческих ферм и комплексов,
- существенные потери фосфора с полей, связанные с нерациональным применением удобрений,
- потери фосфора с промышленными стоками.

Специфической чертой водосбора Псковско-Чудского озера является доминирование в производственной структуре предприятий, обрабатывающих сельскохозяйственную продукцию, которые имеют более высокий потенциал биогенного загрязнения. Кроме того, достоин внимания также вопрос о влиянии возможной разработки месторождений фосфоритов Северо-Восточной Эстонии на фосфорную нагрузку озера.

Поэтому, учитывая опыт моделирования нагрузки на Ладожское озеро (Иванищев и др., 1984) и наш опыт по изучению процесса эвтрофикации Матсалуского залива (Кгõсанова и др., 1987), моделирование пространственно-временной динамики формирования фосфорной нагрузки предполагается проводить по следующим основным блокам:

- коммунальное хозяйство,
- промышленность (главным образом, пищевая),
- животноводство,
- земледелие.

Первоначально мы ограничимся только эстонской частью водосбора. Основные антропогенные потоки фосфора схематически отражены на рис. 1. Количественные оценки потерь фосфора для отдельных блоков могут быть получены с помощью модельных расчетов и эмпирических функций, опирающихся на данные наблюдений. Предполагается рассчитывать межгодовую динамику нагрузки по этим блокам с учетом таких управляющих воздействий, как

- введение в строй очистных сооружений в Тарту и других городах водосбора,
- строительство и реконструкция навозохранилищ,
- применение прогрессивных технологий в земледелии (изменение сроков внесения удобрений, внесение удобрений вместе с семенами, отказ от оборачиваемости пласта на склоновых участках и т. д.).

Остановимся кратко на каждом из выделенных блоков.

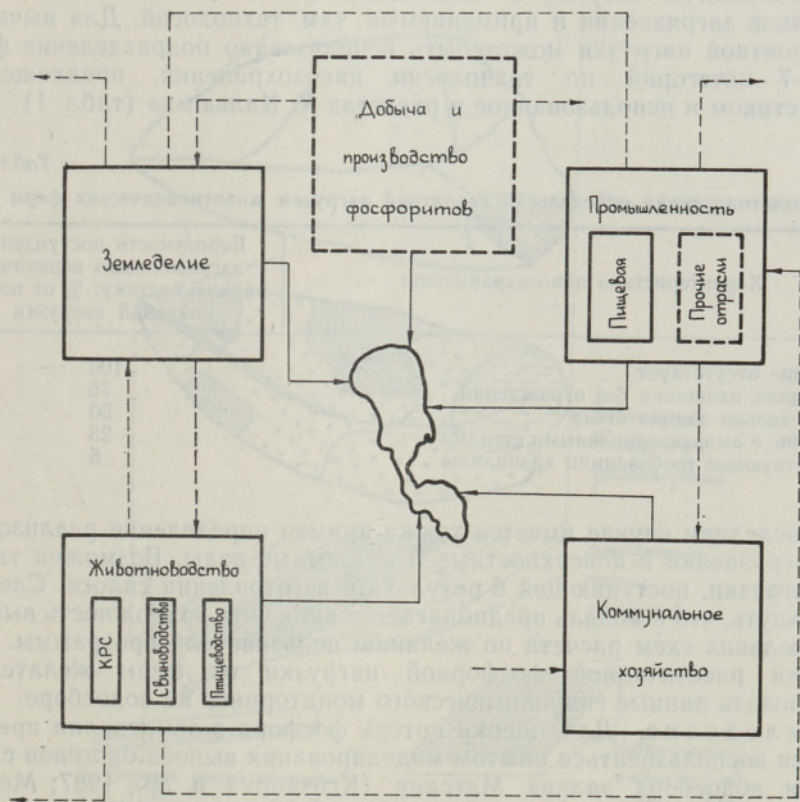


Рис. 1. Схема антропогенных потоков фосфора на водосборе Псковско-Чудского озера.

Коммунальное хозяйство. Для оценки потерь фосфора в коммунальном хозяйстве все города на территории водосбора разделяются на несколько категорий по степени очистки сточных вод, а поселки и деревни учитываются отдельно. Далее потери определяются в зависимости от удельных потерь фосфора в сточные воды на одного человека в городе каждой категории.

Промышленность. Для оценки потерь фосфора на предприятиях (в основном пищевой промышленности) предполагается использовать нормативные данные по удельным коэффициентам потерь на единицу продукции (Maastik, 1984), а также данные о наличии очистных сооружений на предприятиях. Предприятия указанной отрасли главным образом сконцентрированы в Тарту (мясной, молочный, рыбный комбинаты, консервный завод и др.), а также в Выру, Пылва, Валга, Пылтсамаа и других городах водосбора.

Животноводство. В модельных расчетах нагрузки от животноводческих ферм может быть использована методика, предложенная А. Маастиком в монографии «Охрана вод в сельском хозяйстве» (Maastik, 1984). Эта методика использовалась для оценки загрязняющей нагрузки от животноводческих ферм (Kink, Kaljumäe, 1987), расположенных на водосборе Матсалуского залива. **Потенциальная нагрузка** определяется как максимально возможный объем загрязнения в случае, если все загрязняющие вещества попадают непосредственно в водную систему. Потенциальная нагрузка вычисляется обычно в человеко-эквивалентах и может быть пересчитана в фосфорную (1 чел.-экв. = 1,44 г P/сут) нагрузку в зависимости от количества животных по категориям. **Вероятная нагрузка** — это часть потенциальной, которая реально может попасть в водную систему в зависимости от технического состояния источников загрязнения и применяемых там технологий. Для вычисления вероятной нагрузки может быть использовано подразделение ферм на 5—7 категорий по технологии навозохранения, предложенное А. Маастиком и использованное в расчетах Х. Кальюмяэ (табл. 1).

Таблица 1

Расчетная схема определения вероятной нагрузки животноводческих ферм

Характеристика навозохранилища	Вероятность поступления загрязняющих веществ в водную систему, % от потенциальной нагрузки
Хранилище отсутствует	100
Погрузочная площадка без ограждений	75
Имеется только задняя стена	50
Хранилище с амортизированными стенами	25
Соответствующее требованиям хранилище	5

В последнем случае имеется также пример определения реализованного загрязнения в поверхностные и подземные воды. Возможен также учет нагрузки, поступающей в результате изготовления силоса. Следует подчеркнуть, что в модель предполагается включить возможность выбора из нескольких схем расчета по желанию пользователя программы. Для проверки рассчитанной фосфорной нагрузки от ферм желательно использовать данные гидрохимического мониторинга на водосборе.

Земледелие. Для оценки потерь фосфора в земледелии предполагается воспользоваться опытом моделирования выноса биогенов с территории водосбора залива Матсалу (Kõrsanova и др., 1987; Meiner, Roosaare, 1988). Комплекс моделей «Матсалу», состоящий из четырех имитационных моделей, позволяет изучать формирование сельскохозяйственного неточечного загрязнения на водосборе и его влияние на эко-

систему морского залива. При моделировании использовалась сельскохозяйственная, почвенная, метеорологическая, гидрологическая, гидрохимическая и гидробиологическая информация. Водосбор Матсалу достаточно велик (~3600 км²), однако за основу при построении модели был взят малый репрезентативный водосбор р. Раннамыйза, на котором наблюдения проводились в течение двух лет.

Большое внимание уделялось точечным гидрологической и геохимической моделям на водосборе. Проблема учета пространственной неоднородности разрешалась следующим образом. При моделировании выноса биогенов, как процесса с гидрологической основой, первоначально весь бассейн разделялся на 11 малых подводосборов, каждый из которых далее разделялся на определенное количество элементарных водосборов. Каждый элементарный водосбор имеет свою структуру землепользования. С точки зрения имитации неточечного биогенного загрязнения в центре внимания стоят сельхозугодья. Для учета влияния почвенных

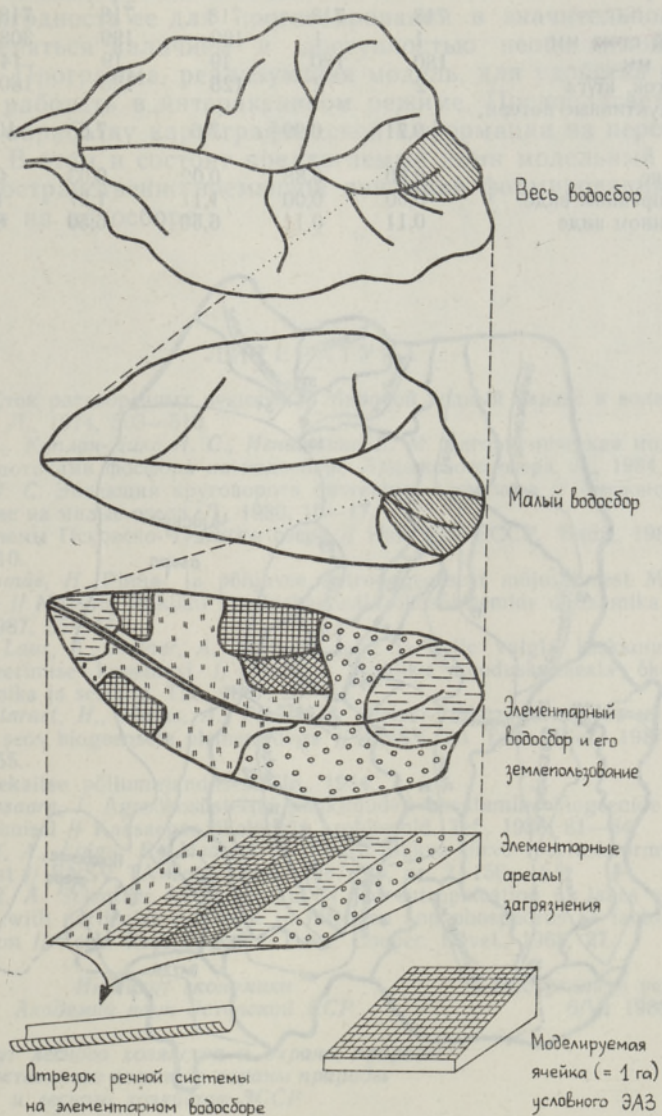


Рис. 2. Пример дезагрегации водосборного бассейна до модельных объектов.

условий на вынос биогенов, сельхозугодья разделялись и по видам почвы (всего рассматривалось 10 видов). Итак, выделяя однородные по виду почвы обрабатываемые площади на элементарном водосборе, мы получили разделение всего водосбора на элементарные ареалы загрязнения (ЭАЗ) (рис. 2). Последние и явились объектом описания точечной геохимической моделью. Результаты моделирования выноса минерального фосфора с удобряемых почв показывают влияние вида почвы на

Таблица 2

Результаты моделирования годовых водных потоков и выноса минерального фосфора с трех видов пахотных почв на фоне суперфосфата 17 кг P/га в апреле

	Супесь		Суглинок		Глина	
	Без навоза	Навоз осенью 80 т/га	Без навоза	Навоз осенью 80 т/га	Без навоза	Навоз осенью 80 т/га
Осадки, мм	718	718	718	718	718	718
Поверхностный сток, мм	1	1	199	199	308	308
Просачивание, мм	180	180	19	19	14	14
Эрозионный сток, кг/га	2	2	125	125	160	160
Общие непродуктивные потери, кг P/га	0,71	0,99	7,6	7,8	10,2	10,4
в том числе:						
выщелачивание	0,60	0,88	0,02	0,03	0,04	0,04
смыв в растворенном виде	0,00	0,00	1,11	1,27	1,28	1,50
смыв в связанном виде	0,11	0,11	6,50	6,50	8,89	8,89

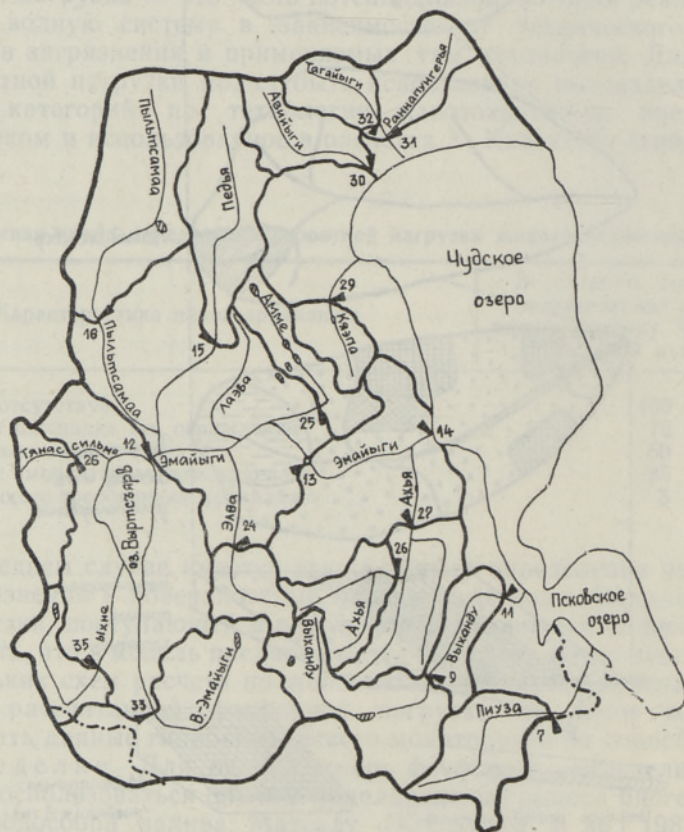


Рис. 3. Разделение эстонской части водосбора Псковско-Чудского озера на малые под-водосборы (стрелкой и номером отмечены пункты гидрологических и гидрохимических наблюдений).

вынос (табл. 2). Смыв биогенов с поверхностным стоком со всего элементарного водосбора определялся как сумма моделируемого смыва с элементарного ареала и оцениваемого на основе мониторинга смыва с фоновых территорий.

Поскольку площадь эстонской части водосбора Псковско-Чудского озера ($>16000 \text{ км}^2$) значительно больше водосбора Матсалу, а точечная модель выноса фосфора уже отлажена для сходных условий, предполагается применить модельный подход с более агрегированным учетом пространственной неоднородности. Эстонская часть водосбора разделяется на 21 малый подводосбор на основе имеющейся сети пунктов гидрологических наблюдений (рис. 3). Временной шаг этих моделей также отличается — для водосбора Матсалу применялся декадный временной шаг, а для Псковско-Чудского озера только годовой.

В заключение хотелось бы отметить, что предлагаемый модельный подход базируется на трех основаниях — модельных расчетах, эмпирических нагрузочных функциях и данных наблюдений. Поэтому качества модели и пригодность ее для прогнозирования в значительной степени будут определяться наличием и доступностью необходимой входной информации. Программа, реализующая модель, для удобства пользователей будет работать в интерактивном режиме. Предполагается также осуществить обработку картографической информации на персональном компьютере. В этом и состоит предлагаемый нами модельный подход к изучению пространственно-временной динамики формирования фосфорной нагрузки на водосборе.

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О. А. Сток растворенных веществ // Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л., 1974, 503—510.
- Иванищев В. В., Коплан-Дикс И. С., Игнашкина Е. М. Алгоритмическая модель управления потоками фосфора на водосборе Ладожского озера. Л., 1984.
- Коплан-Дикс И. С. Эволюция круговорота биогенных элементов // Антропогенное воздействие на малые озера. Л., 1980, 15—17.
- Симм Х. Проблемы Псковско-Чудского озера // Изв. АН ЭССР. Биол., 1987, 36, № 2, 105—110.
- Kink, H., Kaljumäe, H. Pinna- ja põhjavee antropogeenset mõjutatusest Matsalu lahe valglas // Matsalu Riikliku Looduskaitseala ökosüsteemide dünaamika ja seisund. Tln., 1987, 35—47.
- Krõsanova, V., Laur, A., Meiner, A. Matsalu lahe ja selle valgla keskkonna seisundi modelleerimise kogemusi // Matsalu Riikliku Looduskaitseala ökosüsteemide dünaamika ja seisund. Tln., 1987, 25—34.
- Lindpere, A., Starast, H., Milius, A., Pihlak, A. Peipsi-Pihkva järve vee omadused ja nende seos biogeensete elementidega // ENSV TA Toim. Biol., 1987, 36, nr. 2, 146—155.
- Maastik, A. Veekaitse põllumajanduses. Tln., 1984.
- Meiner, A., Roosaaare, J. Agroökosüsteemi punktumudeli kasutamine biogeenide väljakande imiteerimisel // Kaasaegse ökoloogia probleemid. Trt., 1988, 81—84.
- Raia, T., Järvet, A., Loigu, E., Maastik, A. Peipsi-Pihkva järve reostuskoormuse formeerumisest // ENSV TA Toim. Biol., 1987, 36, nr. 2, 156—161.
- Vollenweider, R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econ. Cooper. Devel., 1968, 27.

Институт экономики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
6/VI 1988

Институт лесного хозяйства и охраны природы
Государственного комитета охраны природы
и лесного хозяйства ЭССР

PEIPSI-PIHKVA JÄRVE VALGLA FOSFORIKOORMUSE KIJUNEMISE UURIMISE MUDELKÄSITLUS

Peipsi-Pihkva järve eutrofeerumise pidurdamise eesmärgil on ette nähtud järgmiste ülesannete lahendamine: 1) järve kriitilise fosforikoormuse määramine; 2) valgla fosforikoormuse formeerumise dünaamika imitatsioonmodelleerimine; 3) valgla majandusliku arengu stsenaariumide hindamine ja valik veekaitse seisukohalt lähtudes. Järve kriitilise fosforikoormusena on määratud 749 t P/a. Fosforikoormuse formeerumise uurimine on kavandatud järgmiste reostusallikate lõikes: loomakasvatus, maaviljelus, kommunaalmajandus, toiduainetööstus, võimalik fosforiiditööstus. Punktreostusallikate hindamisel on lähtutud reostuspotentsiaalst ja veekaitseabinõude efektiivsusest (eeskätt puhastusseadmete seisundist), hajureostuse osas aga on tuginetud kogemustele, mis on saadud toitainete väljauhtumise modelleerimisel Matsalu lahe valglas. Fosforikoormuse paljuaastase dünaamika selgitamisel on eeldatud põhiliste mõjuritena Tartu ja teiste valgla linnade ning asulate puhastusseadmeid, sönnikumajanduse korrastamist ja uute taimekasvatustehnoloogiate juurutamist. Valgla fosforikoormuse kujunemise mudel realiseeritakse interaktiivses režiimis töötava programmina personaalarvutil.

Valentina KRYSANOVA, Anton LAUR, Andrus MEINER

THE MODEL APPROACH TO STUDYING THE FORMATION OF PHOSPHORUS LOAD ON THE PEIPSI-PIHKVA WATERSHED

For stopping the development of the eutrophication process of the Lake Peipsi-Pihkva it is advisable to solve three problems: 1) to determine the critical level of phosphorus load; 2) to construct a simulation model of the formation of phosphorus load on the watershed; 3) to evaluate the scenarios of economic development of the region and select the best ones from the standpoint of water quality conservation. The level of critical phosphorus load was determined as equal to 749 t per year. In the investigation of the formation of phosphorus flows the following sources of pollution were picked out: live-stock farming, land cultivation, municipal economy, food industry, possible exploitation of the phosphorite deposit. When estimating the point sources one should proceed from potential pollution and the efficiency of water conservation measures. For the assessing of nonpoint pollution the experience of the modelling of the nutrients losses from the watershed of the Matsalu Bay would be used. In determining the year-to-year dynamics of phosphorus flows the next main factors would be taken into account — purification of sewage in Tartu and other towns, introduction of both progressive methods in land cultivation and proper order in live-stock farming (storage of manure). The model of the formation of phosphorus load on the watershed is now being realized as an interactive program on a personal computer.