

Л.В. ГОРБАТЕНКО

## Метод прогноза водопотребления в трансграничном бассейне реки Амур

*Предложен общий для российской и китайской частей бассейна Амура метод прогноза объемов водопотребления, основанный на применении множественной линейной регрессии. Его возможности показаны на примере прогноза общего водопотребления для российской части и сельскохозяйственного водопотребления для китайской части бассейна. Получены статистически достоверные региональные модели прогноза, отражающие специфику водопользования на российской и китайской территориях бассейна. Качество моделей проверено на независимых данных. Предложенный метод прогноза может быть использован на любых территориальных и отраслевых уровнях.*

*Ключевые слова:* водопотребление, коэффициент корреляции, множественная линейная регрессия, модели прогноза, водоемкие отрасли.

**The method of water consumption prediction in the Russian part of the Amur River basin.** L. V. GORBATENKO (Pacific Geographical Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*The uniform method of water consumption prediction has been proposed for the Russian and Chinese parts of the basin, based on the application of the multiple linear regression. Possibilities of this method are shown on the example of the prediction of total water consumption for the Russian part of the basin and agricultural water consumption for the Chinese part. Calculated statistically significant regional models for the prediction of water consumption reflect the specifics of water use on its Russian and Chinese parts of the basin. The quality of the models is verified on independent data. The proposed method can be used at different territorial and sectoral levels.*

*Key words:* water consumption, correlation coefficient, multiple linear regression, models of prediction, water-intensive industries.

### Введение

В основе эффективного управления использованием водных ресурсов лежит прогнозирование водопотребления. Для трансграничных речных бассейнов, особенностью которых является взаимовлияние процессов использования воды на территории стран-соседей, прогноз водопотребления особенно важен. Для российской части бассейна прогноз водопотребления имеет еще и самостоятельное значение, поскольку он необходим для разработки Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) крупных речных бассейнов, разрабатываемых Федеральным агентством водных ресурсов (Росводресурсы) Министерства природных ресурсов РФ. Это единственный государственный документ, в котором ставится задача прогнозирования водопотребления с учетом будущего развития, т.е. на основе всех имеющихся материалов стратегического и программно-отраслевого планирования. Прогнозы объемов водопотребления должны

---

ГОРБАТЕНКО Лариса Вячеславовна – главный специалист-гидролог (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток). E-mail: glv@tig.dvo.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № RFMEFI61316X0060).

включаться также в схемы водоснабжения и водоотведения, схемы территориального планирования различных уровней (от поселений до муниципальных районов).

Вместе с тем утвержденных ведомственных методик расчета прогнозных значений водопотребления не существует, и разработчики СКИОВО при выполнении работ определяют их самостоятельно. Например, при подготовке СКИОВО бассейна р. Амур для расчета будущего водопотребления на территории бассейна использованы прогнозные данные по объемам валового регионального продукта (ВРП) отдельных административных субъектов, входящих в бассейн, и сведения об их водоемкости [1]. Для прогноза водопотребления применяются также удельные показатели использования воды на душу населения или единицу продукции в натуральном выражении, в том числе укрупненные [3, 4].

Источником данных по укрупненным нормам водопотребления уже 35 лет служит справочник, разработанный под методическим руководством ВНИИ Водгео СССР [8]. Однако эти данные сегодня можно считать устаревшими. В настоящее время в рамках перехода России на наилучшие доступные технологии производства, обеспечивающие снижение нагрузки на окружающую среду, разработаны информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ), которые должны содержать сведения об удельных расходах воды, затрачиваемой на производство единицы той или иной продукции. Общим недостатком как справочника по укрупненным нормам, так и создаваемых в последние годы ИТС является то, что удельные нормы расхода воды приводятся в диапазоне значений «минимальные–максимальные», разброс которых значителен, так как в одной и той же отрасли применяются технологии с различной водоемкостью. Например, согласно справочнику укрупненных норм на производство 1 т белой целлюлозы требуется от 500 до 1400 м<sup>3</sup>, при выработке 1 Мвт·ч электроэнергии – от 100 до 200 м<sup>3</sup> воды [8]. В соответствии с ИТС Росстандарта, детально описывающим производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот в Российской Федерации, на 1 т аммиака в зависимости от технологии расходуется от 0,43 до 3,15 м<sup>3</sup> подпиточной воды; на 1 т серной кислоты в зависимости от производственной установки – от 0,5–0,71 до 1,49–1,9 м<sup>3</sup> воды; производство 1 т фосфорной кислоты при различных процессах (полугидратном или дигидратном) требует от 1,2–4,6 до 5 м<sup>3</sup> подпиточной и от 53–90 до 135–153 м<sup>3</sup> оборотной воды [5]. Однако вышеупомянутый справочник не содержит данных о расходе воды при производстве комплексных удобрений, хотя в этом случае вода также используется (для промывки оборудования и емкостей). Не приводит каких-либо норм водопотребления и справочник по промышленным системам охлаждения, в том числе по прямоточным и оборотным системам на предприятиях черной и цветной металлургии, в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, на тепловых и атомных электростанциях [6]. Кроме того, неясно, насколько эти данные репрезентативны, так как не все предприятия, участвовавшие в анкетировании при разработке ИТС, предоставили заполненные анкеты.

Для сельского хозяйства представлено всего два справочника: ИТС 41-2017 «Интенсивное разведение свиней» и ИТС 42-2017 «Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы». Нет пока ИТС по орошению при возделывании сельскохозяйственных культур, хотя подобный справочник мог бы включать региональные нормы полива, зависящие от климатических характеристик той или иной территории.

Существующие ИТС в целом имеют ряд недостатков: количество справочников гораздо меньше, чем применяемых в Российской Федерации производственных технологий; расходы воды для перспективных технологий в них практически не приводятся; удельные расходы воды даются на момент создания того или иного справочника и помимо ошибки осреднения могут содержать погрешность и вследствие устаревания технологии.

С учетом сказанного выше необходим метод прогноза водопотребления, который мог бы стать общим для трансграничного бассейна р. Амур, поскольку в условиях напряженного водохозяйственного баланса прогноз для китайской его части также имеет большое значение, но при этом удельные нормы водопотребления, применяемые в КНР в различных производствах, нам не известны.

## Исходные данные и методы

Ранее с применением метода корреляционного анализа было показано, что на территории бассейна р. Амур динамика водопотребления демонстрирует синхронность со следующими показателями: численностью населения, объемами производства таких водоемких видов продукции промышленности, как электроэнергия, сталь, целлюлоза, в сельском хозяйстве – размерами посевных площадей риса [2]. Наличие подобной зависимости, объясняемой использованием воды в различных процессах жизнедеятельности населения и хозяйства, открывает возможности прогноза водопотребления (ВП) как в целом по бассейну, так и на уровне входящих в него административных субъектов. В масштабе отдельных субъектов такие прогнозы будут более детальными и точными, поскольку в их пределах не столь сильна дифференциация хозяйственной деятельности, а значит, и набор водоемких производств здесь более ограничен по сравнению с территорией всего бассейна Амура.

Указанные зависимости являются физически обоснованными, они характерны для любых территорий, независимо от страны и структуры ее экономики, при этом перечень водоемких отраслей-индикаторов для каждой территории может быть различен.

Статистический метод прогноза объемов годового водопотребления основан на использовании полинома первой степени (множественная линейная регрессия) [7, 9]:

$$y = \sum b_i \cdot x_i + b_0,$$

где  $y$  – значение отклика, или зависимого признака;  $x_i$  – переменные, обозначаемые как факторы (независимые признаки, предикторы);  $b_i$  и  $b_0$  – коэффициенты регрессии.

Подобные модели не являются сложными, учитывают физический смысл отношений прогнозируемой величины и воздействующих на нее независимых факторов. Их интерпретация не представляет трудностей, и при наличии сильных эффектов для их расчета не требуется большого объема наблюдений.

Применительно к расчету уравнения регрессии для величины водопотребления задача состояла в отборе качественных и наиболее информативных факторов с учетом их взаимозависимости (мультиколлинеарности). Построение модели для водопотребления по каждому из административных субъектов РФ и КНР проводилось в следующей последовательности: расчет корреляционной матрицы с учетом всех анализируемых факторов, проверка на мультиколлинеарность и отбор независимых признаков (факторов), расчет уравнения регрессии с учетом всех возможных комбинаций отобранных признаков, выбор уравнения со статистически достоверными коэффициентами, проверка выбранных моделей на независимых данных и сравнение результатов.

Для российской части бассейна Амура, где крупными водопотребителями являются предприятия электроэнергетики, коммунального хозяйства, а также металлургической отрасли в Хабаровском и сельское хозяйство в Приморском крае, рассчитывалось общее водопотребление. Использованы следующие показатели: объемы производства электроэнергии – Э, млрд кВт·ч; объемы производства стали – С, тыс. т; посевные площади риса – Р, тыс. га; численность населения – Н, тыс. чел.

В расчетах использованы данные за периоды 1992–2010 или 2000–2010 гг. по Забайкальскому, Хабаровскому и Приморскому краям, Амурской и Еврейской автономной областям. Для китайской части бассейна расчетным является период 2004–2013 гг. Используемые временные ряды данных не содержат «отклоняющихся» значений, являются однородными, а анализируемые выборочные графические зависимости оцениваются как линейные.

Для китайской части бассейна Амура (провинции Хэйлунцзян и Цзилинь) рассчитан прогноз водопотребления в сельском хозяйстве, в котором расходуются наибольшие объемы воды. Использованы данные Бюро статистики КНР (<http://www.stats.gov.cn>) по следующим показателям: объемы использования воды в сельском хозяйстве –  $ВП_{сх}$ , км<sup>3</sup>;

площадь орошаемых земель –  $O_p$ , тыс. га; посевные площади отдельных орошаемых сельскохозяйственных культур, тыс. га (риса – Р, пшеницы – П, кукурузы – К, сои – С, овощей –  $O_v$ ); поголовье сельскохозяйственных животных –  $Ж_{сх}$ , тыс. голов.

Полученные модели проверены на независимых данных. Для российской части это данные за 2011–2015 гг., при этом объем независимой выборки составляет не менее 30 % от расчетной. Для китайских провинций проверка модели проводилась на данных за 2014 и 2015 гг. Для расчетов использовался пакет Excel 10.0 при уровне значимости, равном 0,05.

## Результаты и обсуждение

**Российская часть бассейна Амура.** В табл. 1 представлены корреляционные матрицы оценки связей водопотребления и рассматриваемых факторов для каждого из субъектов Российской Федерации, расположенных в пределах бассейна р. Амур.

Таблица 1  
Корреляционные матрицы зависимостей объемов водопотребления и влияющих факторов (2000–2010 гг., для Приморского и Хабаровского краев – 1992–2004 гг.)

Приморский край					Хабаровский край				
	ВП	Р	Э	Н		ВП	С	Э	Н
ВП	1				ВП	1			
Р	0,95	1			С	-0,88	1		
Э	0,82	0,83	1		Э	0,89	-0,59	1	
Н	0,89	0,61	0,67	1	Н	0,97	-0,79	0,56	1

Амурская область				Забайкальский край				ЕАО		
	ВП	Э	Н		ВП	Э	Н		ВП	Н
ВП	1			ВП	1			ВП	1	
Э	-0,95	1		Э	-0,70	1		Н	-0,68	1
Н	0,97	-0,65	1	Н	0,97	-0,73	1			

Матрицы показывают особенности и силу взаимосвязей водопотребления и расчетных показателей в разных регионах. В отдельных случаях связь анализируемого зависимого признака с фактором является практически функциональной, например связь водопотребления и численности населения в Хабаровском, Забайкальском краях и Амурской области. Матрицы демонстрируют также различную направленность связи объемов водопотребления и производства электроэнергии: для Амурской области и Забайкальского края, в отличие от Хабаровского, Приморского краев и ЕАО, она отрицательная, т.е. водопотребление в этих субъектах РФ снижалось на фоне роста производства в такой водоемкой отрасли, как энергетика. Возможно, это свидетельствует о том, что несмотря на сильную скоррелированность этих величин вклад энергетика в увеличение объемов водопотребления в рассматриваемый период был небольшим благодаря широкому использованию в отрасли оборотного водоснабжения. Водопотребление снижалось также вследствие сокращения производства в других отраслях и снижения численности населения.

Отдельные показатели, выбранные в качестве факторов для прогноза водопотребления, сильно коррелированы между собой (например, в Приморском крае коэффициент корреляции между посевными площадями риса и объемами производства электроэнергии равен 0,83, в Хабаровском крае для объемов производства стали и численности населения коэффициент корреляции составляет -0,79), что препятствует включению этих параметров в расчеты при построении модели.

Из всех рассчитанных с учетом взаимосвязанности факторов отобраны качественные модели со статистически достоверными коэффициентами, удовлетворяющие F-критерию (критерию Фишера) (табл. 2).

Расчетные уравнения регрессии (модели прогноза) для российской части бассейна Амура

№ модели, уравнение регрессии	Расчетный период	Коэффициент детерминации	Значение F-критерия*
Приморский край			
1) $ВП = 11,09P + 0,00107H - 1712,5$	1992–2004 гг.	0,99	319
Хабаровский край			
1) $ВП = 1,03H + 29,1Э - 1262,6$	1992–2010 гг.	0,96	120
Амурская область			
1) $ВП = 0,178H - 1,92Э - 37,9$	2000–2010 гг.	0,97	123
2) $ВП = 139 - 4,302Э$		0,90	80
Забайкальский край			
1) $ВП = 3,78H - 3922,6$	2000–2010 гг.	0,95	244
2) $ВП = 3,84H + 6,22Э - 4033$		0,94	63
ЕАО			
1) $ВП = 61,25 - 0,2134H$	2000–2010 гг.	0,46	9

\* Отношение факторной дисперсии к остаточной.

Коэффициенты детерминации, показывающие долю объясненной вариации зависимого признака (в данном случае объемов водопотребления), от факторов, используемых в модели, изменяются в диапазоне от 0,46 для ЕАО до 0,99 для Приморского края. Минимальные из рассчитанных значения F-критерия превышают критические в разы и соответствуют уровню значимости не ниже 0,02.

Полученные модели в Приморском крае, например, показывают, что при неизменности остальных факторов прирост посевных площадей риса на 1 тыс. га увеличит водопотребление на 11 млн м<sup>3</sup> в год при нормах орошения, применяемых в рисосеянии края, в среднем 8–11 тыс. м<sup>3</sup>/га.

В Хабаровском крае на каждый произведенный в будущем 1 млрд кВт·ч электроэнергии водопотребление увеличится на 29 млн м<sup>3</sup> в год, что хорошо согласуется с расчетными данными за 2004 и 2010 гг. – соответственно 29,6 и 29,4 млн м<sup>3</sup>.

Прогноз по полученным моделям показывает хорошую сходимость с фактическими данными: коэффициенты корреляции фактических и расчетных значений водопотребления составляют 0,96–0,98 (рис. 1), исключение составляет ЕАО, для которой этот коэффициент равен 0,68.

Для оценки точности прогноза по независимым данным использован показатель средней абсолютной ошибки, рассчитываемой как средняя за проверочный период разность между фактическим и спрогнозированным значениями

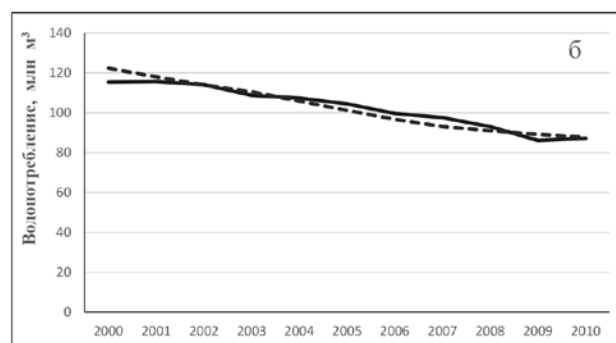
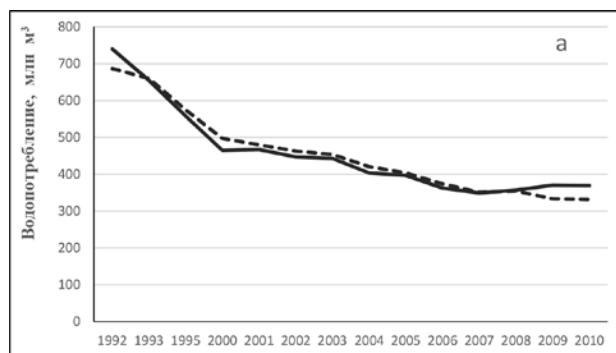


Рис. 1. Согласованность результатов прогноза (пунктирная линия) с фактическими данными (сплошная линия): а – Хабаровский край, б – Амурская область (по модели 1, см. табл. 2)

переменных (объемов водопотребления), нормированная к значению фактической величины. По результатам тестирования полученных моделей на данных за 2011–2015 гг. она составила (%): Приморский край – 4, Хабаровский край – 5, Амурская область – 4,5 (4–5), Забайкальский край – 12,5 (12–13), ЕАО – 17.

Полученные с использованием регрессионного анализа статистически достоверные модели для прогноза водопотребления в Приморском, Хабаровском краях и Амурской области можно оценивать как качественные: ошибка прогноза составляет 4–5 %. Для Забайкальского края и ЕАО модели статистически достоверны, но ошибка прогноза выше – 12,5–17,0 %, что, возможно, объясняется меньшей теснотой связи «фактор-отклик» и (или) наличием неучтенных моделями факторов. Для Забайкальского края добавление к модели, построенной с использованием показателя численности населения, еще одного независимого предиктора (фактора) – производства электроэнергии – практически не улучшило модель, ее точность не увеличилась. Для Амурской области и ЕАО ошибки прогноза за весь проверочный период отрицательные. Это означает, что полученные модели занижают фактическую величину водопотребления в среднем на 5 и 17 % соответственно. Однако существуют трудности с интерпретацией физического смысла полученных отрицательных значений остаточных коэффициентов большинства рассчитанных моделей прогноза. Модели должны показывать значение прогнозируемой величины, но в отдельных случаях факторы, использованные в модели, перестают действовать. Возможно, это свидетельствует о том, что истинная зависимость водопотребления и использованных расчетных факторов не является линейной на всем диапазоне фактических значений параметров, но при этом линейна на выборочных данных.

**Китайская часть бассейна Амура.** Так как вода в провинциях КНР, расположенных в бассейне Амура, расходуется в основном на сельскохозяйственные нужды, важно прогнозировать прежде всего сельскохозяйственное водопотребление, характеризующее потенциал экологической нагрузки как на количество (огромные объемы изъятия вод), так и на качество водных ресурсов (возможный смыв удобрений, взвешенных и других веществ в водные объекты).

В сельском хозяйстве вода используется для орошения возделываемых культур, а также на содержание сельскохозяйственных животных. Большая часть орошаемых сельскохозяйственных земель китайской части бассейна находится в провинциях Хэйлуцзян и Цзилинь. Поэтому ниже анализируются данные о сельскохозяйственном водопотреблении и факторах, определяющих его объемы, именно для этих провинций.

Объемы воды, расходуемой на орошение, определяются набором выращиваемых культур и динамикой наращивания их посевных площадей. В китайской части бассейна Амура в настоящее время основные сельскохозяйственные культуры – зерновые и зернобобовые (пшеница, рис, кукуруза и соя), и все они в той или иной степени являются орошаемыми.

**Провинция Хэйлуцзян.** В табл. 3 представлена корреляционная матрица, отражающая взаимосвязь сельскохозяйственного водопотребления ( $ВП_{сх}$ ) и площади орошаемых земель, в том числе занятых отдельными орошаемыми сельхозкультурами. Практически функциональна связь  $ВП_{сх}$  и общих площадей орошаемых земель ( $r = 0,98$ ). Также высока корреляция водопотребления с посевными площадями риса и кукурузы ( $r = 0,94$ ). Зависимыми (мультиколлинеарными) являются посевные площади риса и кукурузы ( $r = 0,98$ ), что препятствует их включению в одну модель.

Согласно данным матрицы коэффициенты корреляции  $ВП_{сх}$  и площадей под рисом и кукурузой положительные, что указывает на прямое влияние этих факторов на объемы водопотребления. Вместе с тем коэффициенты корреляции между  $ВП_{сх}$  и площадями под соей и пшеницей отрицательные. Это означает, что эти культуры, видимо, меньше орошаются в климатических условиях бассейна Амура, и, следовательно, перераспределение посевных площадей от сои и пшеницы в пользу риса и кукурузы повлечет за собой повышение водопотребления. Таким образом, в качестве индикаторов выбраны орошаемые земли, засеиваемые рисом и кукурузой.

Корреляционная матрица зависимости водопотребления от размера посевных площадей сельскохозяйственных культур и других факторов в провинции Хэйлунцзян

	ВП <sub>сх</sub>	О <sub>р</sub>	Р	П	К	С	О <sub>в</sub>	Ж <sub>сх</sub>
ВП <sub>сх</sub>	1							
О <sub>р</sub>	0,98	1						
Р	0,94	0,96	1					
П	-0,53	-0,48	-0,31	1				
К	0,94	0,95	0,98	-0,37	1			
С	-0,85	-0,86	-0,70	0,66	-0,69	1		
О <sub>в</sub>	-0,50	-0,47	-0,64	-0,35	-0,63	0,14	1	
Ж <sub>сх</sub>	-0,44	-0,38	-0,57	0,31	-0,67	0,12	0,37	1

В сравнении с зерновыми и зернобобовыми размеры посевных площадей под овощами и поголовье сельскохозяйственных животных оказывают слабое влияние на объемы ВП<sub>сх</sub> ( $r = -0,50$  и  $r = -0,44$  соответственно).

В результате анализа полученных уравнений множественной линейной регрессии отобраны модели со статистически достоверными оценками параметров (табл. 4). Остальные модели при уровне значимости 0,05 имеют статистически недостоверные параметры, а добавление слабых факторов в ту или иную модель не улучшает ее. Высокие коэффициенты детерминации показывают, что в зависимости от расчетной модели динамика отобранных факторов на 88–97 % определяет динамику отклика. Модели протестированы на данных за 2014 и 2015 гг., ошибка прогноза составляет 2–9 %. Согласованность расчетных и фактических значений высокая (рис. 2), коэффициент корреляции между этими значениями составляет 94–98 %.

Таблица 4

Расчетные уравнения регрессии (модели прогноза) для провинции Хэйлунцзян

№ модели, уравнение регрессии	Коэффициент детерминации	Значение F-критерия	Средняя абсолютная ошибка прогноза, %
1) $ВП_{сх} = 0,00397O_p + 9,51$	0,97	203,6	2
2) $ВП_{сх} = 0,0067P + 7,36$	0,88	60,7	9
3) $ВП_{сх} = 0,00612P - 0,0227П + 14,3$	0,95	62,5	3
4) $ВП_{сх} = 0,004816P - 0,0025C + 21,1$	0,96	78,3	4
5) $ВП_{сх} = 0,00324K + 11,3$	0,88	60,6	6

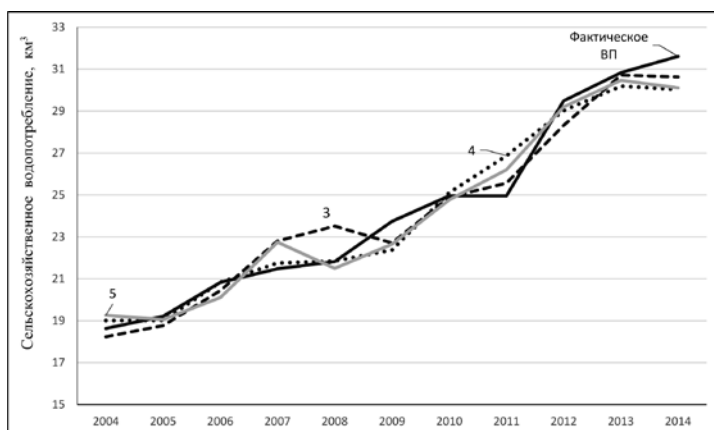


Рис. 2. Согласованность результатов прогноза с фактическими данными для провинции Хэйлунцзян (КНР). 3, 4, 5 – расчетные значения ВП<sub>сх</sub> по моделям № 3, 4, 5 (см. табл. 5)

Корреляционная матрица зависимости водопотребления от размера посевных площадей сельскохозяйственных культур и других факторов в провинции Цзилинь (КНР)

	ВП <sub>сх</sub>	О <sub>р</sub>	Р	П	К	С	О <sub>в</sub>	Ж <sub>сх</sub>
ВП <sub>сх</sub>	1							
О <sub>р</sub>	0,11	1						
Р	0,83	0,20	1					
П	-0,83	-0,37	-0,85	1				
К	0,96	0,08	0,77	-0,70	1			
С	-0,98	-0,22	-0,84	0,75	-0,96	1		
О <sub>в</sub>	0,17	0,62	-0,05	-0,33	0,27	-0,25	1	
Ж <sub>сх</sub>	0,20	0,21	0,51	-0,78	0,20	-0,19	-0,03	1

Параметры полученных моделей показывают, что увеличение общей площади орошаемых земель (без учета структуры посевных площадей) на 1 тыс. га может увеличить водопотребление на 4 млн м<sup>3</sup> в год. Прирост посевных площадей под рисом на 1 тыс. га требует дополнительно 5–6 млн м<sup>3</sup> воды в год при неизменных площадях под другими культурами. Расширение на 1 тыс. га посевов кукурузы повлечет за собой увеличение водопотребления на 2–3 млн м<sup>3</sup> в год. Эти данные хорошо согласуются со средними удельными объемами воды, использованной на орошение в бассейнах рек Сунгари и Ляохэ в 2007–2013 гг. (6774 тыс. м<sup>3</sup> на 1 га).

**Провинция Цзилинь.** Корреляционная матрица, представленная в табл. 5, показывает, что связь между динамикой водопотребления на сельскохозяйственные нужды и площадью орошаемых земель отсутствует ( $r = 0,11$ ), что объясняется наличием «выброса» (или отклоняющегося значения) в данных о площадях орошаемых земель за 2013 г. (они существенно ниже, чем в предыдущие годы). Это может быть также связано с меньшими, в сравнении с провинцией Хэйлуунцзян, посевными площадями водоемкой культуры риса, а также с тем, что кукуруза, основная сельхозкультура Цзилиня, в многоводное лето 2013 г. не требовала орошения. Кроме того, матрица показывает высокие положительные коэффициенты корреляции ВП<sub>сх</sub> и посевных площадей риса и кукурузы (0,83 и 0,96 соответственно).

Статистически достоверные модели для расчета ВП<sub>сх</sub> на территории провинции Цзилинь представлены в табл. 6. Их адекватность в качестве прогнозных проверена на независимых данных за 2014–2015 гг. Согласованность прогнозных и фактических значений высокая в обеих моделях: коэффициенты корреляции между ними составляют 0,96 и 0,99 (рис. 3).

Таблица 6

Расчетные уравнения регрессии (модели прогноза) для провинции Цзилинь

№ модели, уравнение регрессии	Коэффициент детерминации	Значение F-критерия	Средняя ошибка прогноза, %
1) ВП <sub>сх</sub> = 0,0032К – 2,3	0,96	84	8
2) ВП <sub>сх</sub> = 11,04 – 0,0069С	0,91	215,6	2

Полученные для провинции Цзилинь модели показывают, что расширение посевных площадей под кукурузой увеличит объемы воды на орошение на 3 млн м<sup>3</sup> в год на каждую 1 тыс. га новых посевных площадей. В то же время увеличение доли сои в структуре посевных площадей приведет к снижению водопотребления на 7 млн м<sup>3</sup> на 1 тыс. га дополнительных посевов. Связь ВП<sub>сх</sub> с посевными площадями овощей и поголовьем сельскохозяйственных животных отсутствует ( $r = 0,17$  и  $r = 0,20$  соответственно).



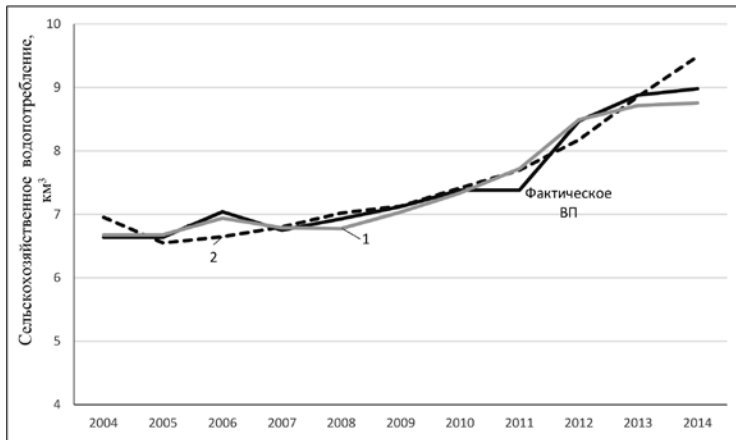


Рис. 3. Согласованность результатов прогноза с фактическими данными для провинции Цзилнь (КНР). 1, 2 – расчетные значения  $ВП_{сх}$  по моделям № 1 и 2 (табл. 6)

Для китайской части бассейна Амура выявлена также тесная зависимость объемов водопотребления от численности населения и производства электроэнергии (коэффициенты детерминации 0,95 и 0,96 соответственно). Это дает возможность прогнозировать водопотребление как в целом для китайской части бассейна Амура, так и отдельно для каждой провинции.

Расчитанные модели, устанавливая количественную взаимосвязь между водопотреблением и определяющими его факторами, учитывают специфику использования воды в сельском хозяйстве, характерную для китайской части бассейна Амура, т.е. являются региональными. Одна из моделей показывает, что в провинции Хэйлунцзян объемы водопотребления практически функционально ( $r = 0,98$ ) связаны с площадями орошаемых земель. Наиболее сильное влияние на водопотребление оказывает наращивание посевных площадей под рисом, кукурузой (увеличивает  $ВП_{сх}$ ) и соей (снижает  $ВП_{сх}$ ). Эффект отклика, т.е. сила зависимости  $ВП_{сх}$  от орошаемых земель и их структуры, определяющая качество прогнозной модели, столь велика, что в отдельных случаях ошибка моделей составляет всего 2–3 %.

## Заключение

Предлагаемые модели прогноза являются альтернативой использованию устаревших укрупненных норм водопотребления, а также удельных расходов воды при производстве продукции, приводимых в ИТС по наилучшим доступным технологиям. Для каждой конкретной территории или отрасли они могут изменяться в зависимости от расчетного периода и выбранных факторов. Следует, однако, понимать, что эти модели являются трендовыми (экстраполяционными), и поскольку они экстраполируют модель за пределы имеющегося диапазона данных, временной горизонт прогнозирования с использованием этих моделей зависит от стабильности условий, определяющих функционирование системы водопользования: набора водоемких отраслей, технологий использования воды при производстве продукции, схем водоснабжения, методов орошения и т.д. На вид моделей для китайской части бассейна Амура в будущем могут оказать влияние переход КНР на водосберегающие методы орошения и масштабы этого перехода. При существенном снижении водоемкости технологий ход динамики водопотребления может измениться нелинейно.

Предлагаемый метод предназначен для укрупненного прогноза и при стабильных условиях, определяющих величину водопотребления, является достаточно надежным. Он основан на данных последних лет и поэтому учитывает изменения, произошедшие в водоснабжении при производстве той или иной продукции (например, увеличение использования оборотной воды и т.д.).

Применение полученных расчетных моделей для прогноза водопотребления требует подбора расчетного периода, выбора достоверного индикатора-предиктора и ежегодной актуализации (пересчета) модели на основе новых данных. Это позволяет выявить смену тенденции (динамики поведения) водопотребления как прогнозируемой величины.

Предложенный метод может быть использован для прогноза водопотребления на различных территориальных и отраслевых уровнях: для крупных речных бассейнов (подбассейнов), субъектов административного деления (краев, областей, муниципальных образований, поселений и т.д.), различных отраслей хозяйства, территориально-производственных комплексов или отдельных предприятий. Расчетные модели могут быть получены также отдельно для прогноза водопотребления на производственные, питьевые или хозяйственно-бытовые нужды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бортин Н.Н., Горчаков А.М. Водно-ресурсный потенциал и водообеспеченность субъектов Российской Федерации, хозяйствующих на территории Амурского бассейна // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 6. С. 96–107.
2. Горбатенко Л.В. Водопользование в трансграничном бассейне реки Амур // География и природ. ресурсы. 2016. № 2. С. 27–35.
3. Горбатенко Л.В. Прогноз водопользования на российской части трансграничного бассейна р. Амур // Проблемы устойчивости эколого-хозяйственных и социально-культурных систем трансграничных регионов: материалы междунар. науч.-практ. конф., Псков, 20–21 ноября 2014 г. Псков: Псков. гос. ун-т, ЛОГОС Плюс, 2014. С. 158–162.
4. Демин А.П. Изменение водоемкости экономики России // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 739–751.
5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 2-2015. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот / Росстандарт, Бюро НДТ. М., 2015. – [www.burondt.ru](http://www.burondt.ru) (дата обращения: 22.07.2016).
6. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 20-2016. Промышленные системы охлаждения / Бюро НДТ. М., 2016. – <http://www.gost.ru> (дата обращения: 14.03.2017).
7. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 424 с.
8. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. 2-е изд., перераб. / Совет экономической взаимопомощи; ВНИИ водоснабжения и канализации, гидротехн. сооружений и инженерн. гидрогеологии. М.: Стройиздат, 1982. 528 с.
9. Шихалев А.М. Регрессионный анализ. Парная линейная регрессия: учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2015. 46 с.