МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Факторы формирования и расчет минимального стока рек Северо-Запада РФ**

Исполнитель Поварницына Татьяна Андреевна

Руководитель ст. преподаватель кафедры гидрологии суши, к.г.н.

Малышева Наталья Геннадьевна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. геогр. наук. Сикан Александр Владимирович

«25» мая 2016 г.

Санкт–Петербург
2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

Факторы формирования и расчет минимального стока рек Северо-Запада РФ

Исполнитель Поварницына Татьяна Андреевна

Руководитель ст. преподаватель кафедры гидрологии суши, к.г.н.

Малышева Наталья Геннадьевна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. геогр. наук. Сикан Александр Владимирович

«___»_____2016 г.

Санкт–Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	ВВЕДЕНИЕ	3
1	ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ	4
1.1	Рельеф и геологическое строение	4
1.2	Почвенный покров и растительность	8
1.3	Общая характеристика гидрографической сети	12
1.4	Подземные воды	19
2	КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ	23
3	УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК СЗ РФ	32
4	АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ	38
4.1	Гидрологическая изученность	38
4.2	Оценка трендов в рядах минимальных 30-суточных расходов воды	40
4.3	Проверка рядов на однородность	43
4.4	Расчет параметров распределения и обеспеченных расходов воды на реках СЗ РФ за период летне-осенней межени	46
5	РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК СЗ РФ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	50
5.1	Построение карты изолиний 80%-го модуля стока для средних рек	50
5.2	Районирование исследуемой территории по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени	51
5.3	Уточнение параметров расчетных формул с использованием двух предикторов	54
5.3.1	Расчет показателя глубины эрозионного вреза	55
5.3.2	Оценка точности расчетных формул	57
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	59
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	60
	ПРИЛОЖЕНИЯ	61
	ПРИЛОЖЕНИЕ А – Эмпирические и аналитические кривые	62

ВВЕДЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе исследовались факторы, влияющие на формирование минимального стока летне-осенней межени. Основное внимание уделялось климатическим характеристикам – осадкам и температуре воздуха и глубине эрозионного вреза русла, определяющего степень дренирования рекой водоносных горизонтов и условия питания реки грунтовыми водами.

Использовались данные по 73 пунктам наблюдений за период с начала наблюдений по 2010 г. включительно. Длина рядов составила от 25 до 76 лет.

В главах 1 и 2 выпускной квалификационной работы бакалавра приводятся соответственно физико-географическая и климатическая характеристики Северо-Запада РФ.

В главе 3 отражены условия формирования минимального стока рек Северо-Запада РФ в летне-осеннюю межень.

В главе 4 проводится анализ исходных данных и расчет статистических характеристик гидрологических рядов, включая их проверку и однородность.

Пятая глава посвящена расчету минимального стока летне-осеннего меженного периода. Построена карта изолиний 80%-го модуля стока для средних рек. Проведено районирование исследуемой территории по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени. Расчет показателя глубины эрозионного вреза позволил уточнить параметры расчетных формул, используя этот показатель в качестве второго предиктора.

В работе производится оценка точности расчетных формул.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам расчетов.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В выпускной квалификационной работе бакалавра рассматривается водный режим рек Северо-Запада РФ. Исследуемая территория расположена в Европейской части России между 67° 40′ – 55° 36′ с. ш. (протяженностью около 1200 км) и 27° 20′ – 37° 57′ в. д. (протяженностью около 420 км). Рассматриваемая зона имеет площадь 396 тыс. км^2.

Северо-Запад РФ включает следующие административные единицы: Ленинградскую, Псковскую и Новгородскую области, и незначительно граничащие с ней участки Архангельской, Вологодской, Мурманской и Тверской областей.

Гидрометеорологическое обслуживание территории выполняется Северо-Западным, Мурманским и Северным УГМС.

1.1 Рельеф и геологическое строение

По характеру геологического строения и по типу рельефа территория Северо–Запада отчетливо разделяется на две части:

1) северо-западную
2) восточную, юго-восточную и южную.

Северо-западная часть расположена в целом на границах Прибалтийской низменности, уходящей на западе на территорию европейских стран, а на севере и северо-востоке уходящей в Карелию.

Прибалтийская низменность – достаточно однообразная слабоволнистая равнина, на которой отчетливо заметен ряд возвышенностей и понижений. Абсолютные отметки поверхности в среднем составляют 50-100 м, но наиболее значительные возвышенности достигают 200-300 м. К таким возвышенностям относятся: Силурийское плато в центральной части Ленин-

градской области, возвышенность в центральной части Карельского перешейка, Лужская возвышенность, которая расположена к северу-востоку от г. Пскова, Бежаницкая – к югу от г. Новоржевка и Судомская – к югу от г. Порхова.

Силурийское плато, преимущественно вытянутое в широтном направлении от р. Нарвы на западе до р. Сяси на востоке, представляет собой плоскую возвышенную равнину. Ижорское плато – западная часть, особенно обширная и приподнятая, Силурийского плато. В этом месте хорошо развит карст в известняках и доломитах ордовика. Вдоль северного края плато наблюдается крутой уступ (глинт), разделяющий его с Предглинтовой низменностью. В западной части уступ обрывистый, высотой до 30-50 м и более, а в восточной части уступ выравнивается и не превышает 15 м.

Центральная Карельская возвышенность - возвышенная мореная равнина, являющейся сильно расчлененной речной сетью. В южной крайней части возвышенности располагаются камовые холмы (Лемболовские, Токсовские высоты и др.).

Лужская, Судомская и Бежаницкая возвышенности – так называемый меридиональный пояс краевых ледниковых образований, соответствующий различным стадиям валдайского оледенения – представляют собой сложное чередование конечноморенных холмов, гряд и камовых холмов с относительными высотами до 100-125 м.

В северной, центральной и западной частях территории расположены обширные низменности с абсолютными отметками от 0 до 50 м. К ним относятся: Вуоксинская низина в северной части Карельского перешейка, Предглинтовая низменность (по местным названиям Лужско-Нарвская, Приморская, Приневская и Приладожская), Приильменская или Волхово-Ловатская низина с котловиной, занятой оз. Ильмень, и Чудско-Псковская низина с впадиной Чудского и Псковского озер.

Возвышенная часть территории Северо-Запада – восточная, юго-восточная и южная – находится в пределах Валдайской возвышенности, ко-

торая дугой окружает Прибалтийскую низменность и направляется от восточного побережья Онежского озера к г. Великие Луки, переходя затем на территорию Литвы и Беларуси. Валдайская возвышенность – краевая зона валдайского ледника, приуроченная к Карбоновому плато, сложенному известняками, а южнее г. Валдая – к выступам в рельефе девонских пород и состоит из холмов и гряд наиболее округлой формы, для которых характерна северо-восточная ориентировка. Относительная высота гряд и холмов от 20 до 50 м. От Прибалтийской низменности Валдайская возвышенность отделена Карбоновым уступом, представляющего собой выположенный склон шириной от 5 до 30 км, а высотой до 70-100 м и прорезанный многочисленными глубокими современными долинами рек, интенсивно дренирующими водоносные горизонты каменноугольных отложений. Местами уступ замаскирован конечноморенными образованиями.

Развитие карста, выражающегося в виде многочисленных карстовых воронок, слепых долин рек, оврагов, озер и источников, создающих на отдельных участках карстовый микрорельеф присуще для Карбонового плато.

Рассматриваемая территория Северо-Запада с точки геологического строения сложена в основном комплексом осадочных дочетвертичных отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании. На территории породы нижнего протерозоя представлены сланцами и гнейсами, а породы среднего протерозоя – терригенные осадки, а также известняками, доломитами и вулканогенными образованиями. Верхний протерозой содержит в себе потнинскую серию, представленную Петрозаводской свитой (кварциты, кварцитопесчаники и глинистые сланцы), и более молодые интрузии. Граниты рапакиви, образующие массивы на северо-восточном берегу оз. Ладожского, относятся к интрузиям верхнего протерозоя.

Осадочные коренные образования территории представлены в основном отложениями палеозоя: толщами нижнего кембрия, нижнего, среднего и верхнего ордовика, среднего и верхнего девона, нижнего и среднего карбона.

Древние стратиграфические горизонты палеозойской группы осадков полого под углом 10-15° погружаются под более молодые в направлении с северо-запада на юго-восток. На крайнем северо-западе области, на склоне Балтийского щита, под четвертичными отложениями залегают рыхлые песчано-глинистые породы нижнего кембрия общей мощностью 200-500 м.

К югу простирается развитая почти в широтном направлении полоса ордовикских отложений, образующая Ордовикское (Силурийское) плато, крупным уступом обрывающееся в сторону Предглинтовой низменности. Ордовикские отложения – известняки, песчаники и доломиты общей мощностью 100-150 м, для этих пород характерна трещиноватость и присущ карст. Массивы из карста являются хорошими аккумуляторами подземных вод. По окраинной внешней части возвышенностей обычно прослеживается обильное выклинивание их, что приводит к повышению значения модулей стока. Для областей распространения карста свойственно большое изменение стока на небольших площадях. На некоторых участках Силурийского плато с увеличением мощности четвертичных отложений до 6-8 м (морена) формы карста на поверхности почти не развиваются. Следовательно, на Волховском плато, где мощность покровных отложений достигает временами 15 – 20 м, плохо развиты формы карста. Хорошо развит современный карст на Ижорском плато, покрытым пластом морены 1-2 м.

К югу и востоку от Ордовикского плато располагается большая область развития наиболее рыхлых девонских отложений, занимающих около 60% всей территории Северо-Запада. Девонские отложения описываются двумя отделами: средним (песчаники, доломиты, мергели) и верхним (известняково-мергелистая и пестроцветная толщи). Мощность отложений среднего девона 50-150 м, верхнего девона – до 300 м. Область формирования девонских отложений с востока и юго-востока заменяется вытянутой полосой пород каменноугольного возраста, слагающих так называемое Карбоновое плато. Каменноугольные отложения представлены нижним и средним отделами. Нижний карбон включает в себя известняково-глинистую и известняково-

доломитовую толщи мощностью 60—95 м. Средний карбон сложен известняками и доломитами. Мощность его неравномерная и изменяется в пределах 12-80 м. Известняки карбона трещиноватые и закарстованы. На Карбоновом плато развиваются карстовые формы рельефа, там где мощность четвертичных отложений составляет до нескольких метров. Некоторое развитие карст имеет в пределах распространения карбонатно-гипсовых отложений среднего девона на территории Псковской области.

Палеозойские осадочные породы везде перекрыты толщей четвертичных отложений, мощность которых изменяется в больших пределах (0,5-200 м). Эти отложения описаны комплексом ледниковых и послеледниковых образований. Московская морена является древним образованием. Выше залегает комплекс позднеледниковых песчаных флювиогляциальных и озерно-ледниковых песчано-глинистых отложений. Заканчивается разрез четвертичной толщи послеледниковыми и современными отложениями. Как правило это покровные образования: озерные, морские песчано-глинистые отложения, аллювиальные наносы, торфяники, эоловые (дюнные) пески. На участках Силурийского плато отмечается минимальная мощность четвертичных отложений от 0,5 до 5 м, а наибольшая их мощность достигает 160 – 200 м около Судомской возвышенности.

1.2 Почвенный покров и растительность

На территории Северо-Запада важнейшими процессами почвообразования являются заболачивание и подзолообразование. Это зависит от преобладания лесной, больше всего хвойной растительности на данной территории. По характеру почвообразования территория может быть разбита на две зоны: северную и южную. Граница между зонами проходит ориентировочно на широте Ладожского и Онежского озер.

В северной части почву образуют такие породы, как ледниковые наносы, большей частью неоднородные, грубые по механическому составу; в

южной части присутствует различие механического состава почв, потому что моренные отложения имеют разную структуру – от песков до глин.

Слабоподзолистые почвы, развитые на суглинистых и супесчаных породах, преобладают на Онежско-Ладожском водоразделе. На Восточно-Онежской равнине самые распространенные суглинистые и песчано-пылеватые почвы.

На территории, расположенной к югу от Ладожского и Онежского озер, хорошо распространены слабо- и среднедерновоподзолистые почвы, болотные и подзолистые. Очень редко попадаются дерново-карбонатные и аллювиальные почвы. На рассматриваемой территории по механическому составу выделяются почвы глинистые, тяжелосуглинистые, средне- и легкосуглинистые, супесчаные и песчаные. Много здесь супесчаных почв , а также преобладают суглинистые почвы на валунных суглинках.

В Приладожье и районах Приволховской низины встречаются подзолисто-глеевые и торфяно-глеевые почвы, на Карельском перешейке широко распространены слабо- и среднеподзолистые почвы, суглинистые на валунных суглинках и супесчаные.

В бассейне р. Луги преобладают дерново-подзолистые и дерново-карбонатные почвы на карбонатных валунных суглинках. В центральной части и низовье бассейна встречаются заболоченные почвы.

В северной части Псковской области преобладает сочетание подзолистых почв легкого механического состава от песчаных до легких суглинков и заболоченных. А для южной части области свойственна большая связность почв и меньшая их оподзоленность, чем в северной части. В дерново-буроподзолистых почвах хорошо развит гумус и они более влагоемки. По побережью Псковского озера, благодаря близкому расположению уровня грунтовых вод и подтоплению водами озера, образовались осоковые и тростниково-камышовые болота низинного типа.

В Новгородской области распространены все разновидности подзолистых почв, в том числе дерново-подзолистые почвы. Юго-западная часть

Приильменской низины имеет дерново-карбонатные почвы. Они отличаются хорошо развитым перегнойным горизонтом, отсутствием подзолистого горизонта и сравнительно тяжелым механическим составом. На восточном побережье оз. Ильмень преобладают аллювиально-луговые почвы.

Волховско-Ильменская низменность к северу от оз. Ильмень сложена в основном ленточными глинами, но в отдельных местах выделяются карбонатные отложения, они играют малую роль в процессе почвообразования. Здесь широко распространены подзолисто-глеевые, торфяно-глеевые почвы. Лишь к востоку от р. Волхова встречаются песчаные отложения с преобладанием сильно подзолистых почв.

Ландшафт конечных морен, обусловливающий значительную пестроту почвообразующих пород, свойствен Валдайской гряде. В целом она сложена валунными суглинками, а ложбины и впадины, занимающие пространство между грядами, заняты озерами, заболоченными почвами и болотами. Поэтому почвенный покров здесь крайне разнообразен. Преобладают дерновые, дерново-слабоподзолистые и сильноподзолистые почвы различного механического состава. В юго-восточной части Валдайской возвышенности находятся карбонатные отложения, к которым приурочены дерновые и дерново-подзолистые почвы. В южной части возвышенности, исключая суглинистые, встречаются грубопесчаные отложения с преобладанием средне и сильноподзолистых почв.

Рассматриваемая территория Северо-Запада находится в зоне достаточного и избыточного увлажнения. Впрочем влагозапасы в почво-грунтах также находятся в прямой зависимости от механического состава и глубины залегания грунтовых вод.

Влагозапасы в почве зависят от промерзания почвы в зимнее время. Глубина промерзания почвы зависит от рельефа местности, механического состава почвы и ее увлажнения, но в основном от интенсивности нарастания отрицательных температур воздуха и наличия снежного и растительного покрова.

Рассматриваемая территория Северо-Запада расположена больше в южной подзоне тайги. Только небольшая северо-восточная часть ее находится в подзоне средней тайги, а крайняя юго–западная - в зоне смешанных лесов.

Для Северо-Запада типичны темнохвойные (еловые) леса, покрывавшие в прошлом большую часть этой территории. Главная группа - ельники-зеленомошники описываются хорошо развитым древостоем из ели и обильным напочвенным покровом из мхов. В северной части эта группа представлена в основном типом черничного ельника с моховым покровом и с обильным развитием черники в травяно-кустарниковом ярусе. Широко распространены заболоченные еловые леса (сфагновые ельники). На дне долин, на заболоченных почвах встречаются травяные ельники с густым и высоким травяным покровом. На равнинах, где наблюдаются плохо дренированные сильно оподзоленные почвы, развиты ельники-долгомошники. Зачастую лес приобретает характер смешанного елово-соснового с некоторым добавлением березы.

Лиственные леса представлены особенно мелколиственными породами (березой, осиной, ольхой). На юго-западе проявляются широколиственные породы (клена, липы, дуба, вяза, ясеня). Вдоль побережья Финского залива и по рекам Волхову и Луге встречаются малые дубравы.

Территория Северо-Запада на половину занята лесами. Под воздействием вырубок и пожаров обильно распространились производные березовые и осиновые леса, на некоторой территории почти полностью заменившие коренные леса. В северных и северо-восточных районах преимущественно леса занимают 70-80% территории. Максимальная лесистость (до 85%) отмечается в бассейне р. Ояти и верховьях р. Сяси, а наименьшая наблюдается в более освоенных западных и южных районах. Действительно, в верхнем и среднем течении р. Ловати, в бассейне р. Шелони, в нижнем течении р. Великой залесенность уменьшается до 40-30%.

Примерно 30% территории занимают болота и заболоченные земли. Приильменская низина выделяется сильной заболоченностью. Большое количество болот располагается в долине р. Невы, у Ладожского озера, в нижнем течении р. Свири. Болота больше всего верховые (сфагновые), частично низинного и переходного характера (осоковые, осоково-пушицевые, осоково-сфагновые и др.).

Всего 7% территории занято лугами. Большинство лугов суходольные со злаково-разнотравной растительностью (душистый колосок, щучка, белоус, мятлик луговой, полевица, манжетка, различные виды клевера). Пойменно-заливные луга, отнесенные к долинам крупных рек. Большие массивы заливных лугов расположены в долине р. Волхова, на побережье оз. Ильмень и в низовьях рек, впадающих в это озеро. Здесь характерны злаковые и бобовые сообщества: ежи, тимофеевки, пырея, мышиного горошка, клевера с луговым разнотравьем.

На данной территории растительный покров подвергся продолжительному воздействию человека. Большая часть земель стала распаханной или превращенной в сельскохозяйственные угодья. Северные и северо-восточные районы являются мало распаханными землями (1-5%), а в западных и южных районах наибольшая часть земли распаханная (20-30%).

1.3 Общая характеристика гидрографической сети

Территория Северо-Запада обладает хорошей развитой гидрографической сетью, которая принадлежит бассейну Балтийского моря. Так как этот район имеет избыточно влажный климат, то это приводит к наличию большого количества рек, озер и болот. Большая часть рек Северо-Запада берет начало на главном водоразделе между Балтийским и Каспийским морями, проходящего по Валдайской возвышенности и простирающейся на северо-восток от нее Вепсовской возвышенности. Второй водораздел тянется с юга на север по Вязовской, Бежаницкой и Судомской возвышенностям и далее по

повышенным точкам рельефа к западу от р. Волхова, примерно параллельно ему. Этот водораздел внутренний и разделяет бассейны рек, впадающих в Балтийское море. На нем находятся истоки рек Великой и Луги. Все реки по типу относят к равнинным. Впрочем близость основного водораздела к главному базису эрозии рек – Балтийскому морю и к отдельным базисам эрозии, которыми для многих рек являются озера: Ладожское, Онежское, Ильмень, Чудское, Псковское, придала рекам довольно значительные падения. В нижнем течении, как правило, падение рек небольшое, течение медленное.

Главным водным путем района является р. Нева с площадью водосбора 281 000 км^2, значительная часть которой захватывает территорию Карелии. Собственный бассейн р. Невы 5000 км^2, что равно 1,8% общей площади водосбора. Густота речной сети ее притоков колеблется от 0,70 (р. Мга) до 1,29 км/км^2 (р. Охта).

На данной территории центральное место занимает Волховско-Ильменский бассейн. Густота речной сети его составляет 0,75 км/км^2. Больше всего развитую гидрографическую сеть имеют реки Пола, Ловать и Шелонь (0,84-0,96 км/км^2). Многие реки Волховско-Ильменского бассейна берут свое начало из водораздельных болот. В верхнем течении, долины их не выражены или слабо выражены; русла разработаны слабо, реки часто теряются в зарослях кустарника и болотной растительности; уклоны рек очень малы. Речные системы состоят из цепи озер, соединенных короткими протоками, в верхней части Волховского бассейна. Ниже по течению русла рек часто врезаются в коренные породы.

На устьевых участках реки разветвляются на многочисленные рукава, образуя обширные дельты (реки Мета, Пола, Ловать).

Два крупнейших озера Северо-Запада Онежское и Ладожское соединяются благодаря реке Свирь. Значительная часть водосбора реки расположена в пределах Карелии. Коэффициент густоты речной сети собственного бассейна р. Свири равен 0,52 км/км^2. Главными ее притоками, левыми, являются Оять и Паша.

В верхней части бассейна рек, впадающих в Ладожское озеро с юга, есть некоторые реки (Рядань, Сухая, Пярдомля, Рагуша, Черенка, Лининка, Ольха и др.), которые имеют подземные русла длиной от 0,1 до 4 км, что обусловлено наличием карста. Речные воды уходят и текут по подземному руслу, после чего вновь выходят на поверхность. В большинстве случаев расход воды рек заметно увеличивается после выхода потока на поверхность, но порой уменьшается, объясняя тем что, отдает ли подземное русло воды известнякам или дренирует последние.

Реки, прорезающие Карбоновое плато в северной и южной частях (Воложба, Рядань, Белая, Мета и др.), отличаются по характеру долины, русла и питанию от рек, стекающих с уступа в центральной части плато (Мда, Сясь в верховье, Шуя, Дрегля и Крапивная). Эти реки питаются за счет подземных карстовых вод, принимают в себя значительное количество родников. Реки центрального участка питаются в основном атмосферными осадками и в силу малой обводненности отложений нижнего карбона подземные воды здесь играют значительно меньшую роль в питании рек. В засушливые годы реки на этих участках местами пересыхают. На Карбоновом плато, особенно в районе глинта, реки, прорезая известняки, имеют каньонообразные глубокие долины, порожистые русла, уклоны их здесь составляют 2-5 ‰. Течение рек бурное и по внешнему виду они приближаются к типу горных. В местах, где реки прорезают область рыхлых отложений карбона и девона, они принимают характерный равнинный вид: долины их расширяются, высота склонов уменьшается, русла сильно меандрируют, пороги исчезают.

Реки, которые берут начало с внутреннего водораздела (Луга, Плюсса), имеют тоже хорошо развитую гидрографическую сеть. Коэффициент густоты речной сети р. Луги равен 0,70, р. Плюссы — 0,64 км/км^2. Почти все эти реки берут начало из болот. В верхнем течении они обладают обычно пойменными долинами с пологими, невысокими склонами; в среднем течении долины хорошо разработанные с крутыми и высокими, нередко террасированными

склонами; в нижнем течении долины снова расширяются и склоны становятся пологими.

Густота речной сети рек Чудско-Псковского бассейна составляет в среднем около 0,90 км/км^2. Лишь только в бассейне р. Великой насчитывается 12 658 рек общей длиной 23 448 км, из них 99% общего числа имеет длину менее 10 км.

В восточной и южной частях бассейна находится большое количество озер. В нижней и средней частях бассейна долины рек неглубокие с широкими поймами и пологими склонами. Русла очень извилистые; течение слабое; берега низкие, часто заболоченные.

Река Великая в устье разветвляется и образует большую дельту с многочисленными рукавами и островами.

В центральной части Ижорского плато, гидрографическая сеть почти отсутствует. Густота речной сети в этом месте не превышает 0,07 км/км^2. Атмосферные осадки легко проникают в толщу карстующихся известняков. По наблюдениям в 1969 г. на р. Суме, на участке между деревнями Утешение и Домашево, было выявлено, что через трещины в известняках, создающих русло, теряется до 50-70% руслового стока.

Реки северной окраины плато, текут в глубоко врезанных долинах и имеют полугорный характер, а проходя по низменности, постоянно извилисты и заболочены. В строении продольных профилей рек видны резкие переломы, соответствующие Силируйскому глинту. Уклоны рек здесь варьируются от 1,47 - 3,93 ‰.

На Сланцевском участке Силурийского плато (оно ограничено на западе р. Нарвой, на востоке – р. Лугой) виднеются карстовые явления. Русло р. Плюссы местами порожистое; по обоим берегам реки здесь имеются карстовые воронки, лога и карстовые источники.

Реки Северо-Запада характеризуются слабой естественной зарегулированностью озерами, кроме рек Невы, Свири и Волхова, режим которых полностью находится под влиянием озер Ладожского, Онежского и Ильменя.

Северо-Запад входит в зону так называемого «Озерного края» это значит, что территория насыщена озерами. Такие края обычно используются для целей транспорта, сплава леса, рыбного хозяйства, водоснабжения, энергетики и приобретают значимую роль как водохранилища для регулирования стока малых и средних рек района.

Озера по территории Северо-Запада распределены неравномерно и вызвано, в большей мере, геолого-геоморфологическим строением поверхности.

На территории Карельского перешейка расположено наибольшее количество озер.

Второй многочисленный пояс озер расположен в юго-западной и юго-восточной частях территории, в районах моренных возвышенностей. Особенно много озер находится на возвышенностях Валдайской, Струго-Красненской, Судомской и Новоржевской. А именно в бассейнах р. Меты озер насчитывается 1892, р. Ловати – 1792 и р. Великой – 3604.

Хоть и находится большое количество озер в верховьях бассейнов рек Меты, Ловати, Великой, Луги, но все равно озерность этих рек небольшая и меняется от 1,8 до 2,8%. Впрочем, притоки их, расположенные в озерной области, имеют повышенный процент озерности.

Согласно происхождению озерных котловин выделяют два основных типа озер: тектонические и моренные.

Котловины тектонического происхождения развиты в трещинах и сбросах, обычно вытянуты с северо-запада на юго-восток, состоят из длинного плеса и большого числа узких вытянутых заливов или имеют ластовидную форму.

Важную роль в образовании и изменении озерных котловин сыграло четвертичное оледенение. Тектонические котловины озер имеют ярко выраженные последствия эрозионной деятельности ледника. Отчетливо это прослеживается на примере Онежского и Ладожского озер, северные берега которых изрезаны длинными и узкими заливами, ориентированными в направ-

лении движения ледника – с северо-запада на юго-восток. По характеру дна и берегов озера разделяются на две части: северную, отличающуюся большой глубиной, наличием многочисленных длинных и глубоких ям, и южную, имеющую ровный рельеф и сравнительно небольшие глубины.

На территории Северо-Запада встречаются озера моренного типа. Котловины таких озер относятся к понижениям между моренными грядами и холмами или образованы из-за подпруживания долин ледниковыми отложениями. Эти озера имеют небольшие размеры округлой формы, слабо развитую береговую линию и плоские берега. Глубины, как правило, не превышают 5-10 м, рельеф дна плоский. На дне озер часто залегают отложения ила, мощность которого достигает 1-3,5 м. Среди озер моренного типа довольно часто встречаются узкие длинные озера, через которые протекают реки. Так, р. Великая в своем верхнем течении протекает через 21 озеро, из которых многие имеют длинную узкую форму. Ильмень – это большое озеро ледникового происхождения на территории Северо-Запада занимающее центральное положение и представляющее собой мелководный водоем, глубина которого не превышает 3-4 м в прибрежной зоне и 10 м в центральной. Первоначально впадина озера была свыше 20 м, но с течением времени она заполнилась мощными отложениями ила. Берега озера преимущественно низкие, заболоченные. Отличительной особенностью озера является большое изменение площади зеркала с изменением высоты уровня воды. Площадь зеркала озера при среднем положении уровня составляет 1090 км^2, при наивысшем – 2096 км^2, при наинизшем – 700 км^2. Помимо озер тектонического и моренного типов на рассматриваемой территории встречаются озера, происхождение котловин которых связано с другими факторами. К ним относятся озера лагуно-лиманного типа, а также болотные и карстовые. Ряд лагунных озер образовался в результате полного или частичного отчленения от моря мелководных бухт и заливов, или путем затопления морем низовьев рек, впадающих в Финский залив. Сюда относятся озера Липовское, Белое, Хаболовское, Лахтинский разлив и другие. Эти озера имеют обычно округлые очертания

или вытянутые в направлении реки, в русле которой они образовались. Берега их преимущественно низкие и заболоченные, глубины незначительные.

На территории Северо-Запада распространены озера болотного типа. Больше всего такие озера расположены в заторфованных равнинах Волховско-Ильменской низменности, в частности среди Полистовского болотного массива. Обычно озера этого типа имеют незначительные площади 0,5-1 км^2, глубина их небольшая, дно заиленное. Озера сильно зарастают водной растительностью и часто растительный покров почти целиком затягивает поверхность озер, оставляя лишь небольшие открытые пространства – «окна». Среди болотных озер встречаются и более крупные, например оз. Дубец с площадью зеркала 11,3 км^2 и площадью водосбора 77,5 км^2.

На территории Карбонового и Силурийского плато, где близко от поверхности залегают легко карстующиеся известняки, в питании озер преобладают карстовые воды. Площадь этих озер колеблется в широких пределах: от 0,003 км^2 (оз. Ямное) до нескольких квадратных километров, но большинство из них имеет площадь менее 1 км^2. Озера, большей частью овальной формы, вытянуты с северо-запада на юго-восток, реже с северо-востока на юго-запад. Берега и дно озер являются неровными; часто наблюдаются от одной до нескольких поглощающих воронок (понор). Вода из карстовых озер может совершенно исчезать, уходя в поноры. На Карбоновом плато наряду с карстовыми озерами развито большое количество озер, которые по форме, изрезанности берегов и общей ориентировке по отношению к Карбоновому уступу аналогичны карстовым озерам, но режим их резко отличается от последних. Чаша таких озер всегда наполнена водой, колебания уровня незначительны и связаны исключительно с количеством выпадающих осадков и величиной испарения.

Нужно также отметить значительное количество озер, образовавшихся в дельтах рек Меты, Ловати и Полы. Наиболее крупными из них являются Колодежское (F = 2,6 км^2), Ситное (F = 6,7 км^2), Жирохлицкое (F = 5,0 км^2).

Примерно все озера рассматриваемой территории сточные или проточные, а бессточных озер мало и площадь зеркала их обычно небольшая.

1.4 Подземные воды

Важная роль в формировании речного стока Северо-Запада лежит в подземных водах. Для данной территории характерна развитая речная сеть, что активизирует подземный сток в зоне интенсивного водообмена, мощность которого определяется дренирующей способностью рек, которая зависит от глубины эрозионного вреза речных долин, глубина же вреза их достигает нескольких десятков метров.

Направленность подземного стока в сторону Балтийского моря схоже с движением подземных вод в сторону крупных водоемов, приуроченных к обширным котловинам тектонического происхождения (озера Ладожское, Онежское, Ильмень, Псковское). На направление стока подземных вод на отдельных участках оказывают влияние и древние долины основных рек района: Волхова, Свири, Меты, Великой и др.

Котловины озер и долины рек являются зонами разгрузки не только водоносных горизонтов зоны интенсивного водообмена, но и более глубоких напорных водоносных комплексов.

Часть территории Ленинградской, Псковской и Новгородской областей входит в Ленинградский артезианский бассейн. В вертикальном гидрогеологическом разрезе чётко выделяются два яруса подземных вод: нижний, охватывающий гдовский водоносный горизонт, и верхний, включающий водоносные комплексы от кембро-ордовикского до четвертичного.

Глубина залегания подземных вод в четвертичных отложениях изменяется в широких пределах в зависимости от абсолютных отметок местности. Наибольшее распространение имеют безнапорные грунтовые воды. По химическому составу подземные воды четвертичных отложений в основном гидрокарбонатно-кальциевые, пресные.

Подземные воды дочетвертичных отложений заключены в обломочных и карбонатных породах нижнего и среднего карбона, верхнего и среднего девона, а также ордовика, кембро-ордовика и нижнего кембрия. Водовмещающими породами являются пески, песчаники, доломиты, мергели, в различной степени глинистые и трещиноватые известняки. Водоносными горизонтами, интенсивно используемыми для хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения являются:

1. Гдовский комплекс в песчаниках и алевритах с пресными водами в центральной полосе Карельского перешейка и с минерализованными водами в районе Ленинграда и его окрестностей;

2. Ордовикский комплекс в трещиноватых известняках на Силурийском плато и к югу от него;

3. Бурегский горизонт в известняках и доломитах в западной и южной частях Псковской области и на южном побережье оз. Ильмень;

4. Веневско-протвинский комплекс в Бокситогорском и Боровичском районах.

Часть водоносных горизонтов и комплексов (пески кембро-ордовика, мергели и др.) характеризуются неравномерной водообильностью, иногда слабой водоносностью, но в отдельных районах служат единственным источником водоснабжения.

Важными признаками Ленинградского артезианского бассейна является наличие ряда возвышенностей и депрессий, соответствующих областям питания и разгрузки водоносных горизонтов. К таким депрессиям относятся: Лужско-Нарвская, Псковско-Чудская, Ладожско-Волховская, Ильмень-Ловатская. Возвышенности: Лемболовская, Ижорская, Лужская, Судомская, Бежаницкая, Олонецкая, Вепсовская, Валдайская. Направление движения подземных вод от областей создания гидростатического напора к областям разгрузки зависит от распределения возвышенностей и депрессий.

Основным источником подземного питания рек описываемой территории являются грунтовые воды, часто гидравлически связанные с рекой, и напорные подземные воды.

На севере территории в пределах Предглинтовой низменности, ограниченной с юга резко выраженным в рельефе уступом глипта, подземный сток в реки формируется в основном за счет вод четвертичных отложений. Мощность четвертичного покрова здесь возрастает от 20—30 до 100 м. В этой части развиты подземные воды аллювиальных, озерных и флювиогляциальных отложений, приуроченные в основном к мелкозернистым пескам. Глубина залегания грунтовых вод колеблется от 0,2—0,3 до 20 м, обычно составляя 1—5 м. Количество поступающей воды из колодцев и скважин не превышают 0,5 л/сек. На некоторых участках Предглинтовой низменности, где морена размыта, морские и подморенные флювиогляциальные пески образуют единую водоносную толщу. Дебиты скважин тогда достигают 10—15 л/сек.

Южнее, в пределах Силурийского (Ордовикского) плато, подземный сток в реки формируется благодаря водам трещиноватых и закарстованных известняков и доломитов силура и ордовика, перекрытых маломощной толщей четвертичных отложений. Водообильность силур-ордовикской карбонатной толщи определяется степенью ее трещиноватости и закарстованности. Дебиты многочисленных родников достигают 100 л/сек, а отдельных групп родников 200-250 л/сек. Крупные родники - начало многих рек.

К югу от Силурийского плато в карбонатных и пестроцветных породах, песчано-глинистых породах среднего девона содержатся грунтовые и напорные подземные воды, которые также принимают активное участие в подземном питании рек. Глубина залегания среднедевонского водоносного комплекса обычно не превышает 10-20 м, удельные дебиты колодцев и скважин находятся, как правило, в пределах 0,01-0,2 л/сек, но на многих участках территории достигают 1-2 л/сек и более. На этой территории, которая по площади занимает большую часть рассматриваемых областей, грунтовые воды чет-

вертичных отложений во многих случаях являются основным источником питания рек в межень. Широкое распространение подземных вод в суглинках основной и конечной морены является основным источником подземного питания малых водотоков.

На территории Северо-Запада величина подземного стока в реки может быть от 0,8 до 5,5 л/сек км^2, что составляя от 11 до 54% общего стока.

2 КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Значение годового радиационного баланса на территории Северо-Запада колеблется в пределах 32-35 ккал/см^2, составляя 40-45 % суммарной радиации. Период с положительным радиационным балансом длится от третьей декады марта до начала ноября. Наибольших значений радиационный баланс достигает в мае – июле, составляя 7,0 – 8,5 ккал/см^2, т.е. 50-60 % суммарной радиации, наименьших – в декабре – январе – 0,5 – 1,2 ккал/см^2. Сумма отрицательного радиационного баланса в среднем равна 2-3 ккал/см^2.

Средняя годовая температура воздуха на рассматриваемой территории изменяется от 2^o в северо-восточной части до 4,5^o в южной.

Самым холодным месяцами в году являются январь и февраль. Средняя месячная январская температура Северо-Запада около -7^o на западе территории и ниже -11^o на северо-востоке.

Лето, за начало которого принимается переход средней суточной температуры воздуха через 10^o, наступает в первой декаде мая в южной части Псковской и Новгородской областей, в середине-конце мая – на остальной части Северо-Запада. Наибольшая продолжительность лета в Псковской и Новгородской областях – около 4 месяцев.

В начале лета ещё возможны заморозки. Раньше всего заморозки прекращаются на побережьях озер Ильмень, Псковского и Чудского в первой декаде мая. К концу мая они заканчиваются почти повсеместно и только на востоке Ленинградской области возможны заморозки в первой декаде июня.

Осень наступает раньше всего в восточных районах Ленинградской и Новгородской областей.

На Северо-Западе зима начинается в конце октября в восточной части Ленинградской области и во второй декаде ноября – в южной части Псков-

ской и Новгородской областей, а также в западной части Псковской и Ленинградской областей. Первая половина зимы, или так называемое предзимье, характеризуется преобладанием ненастной погоды с выпадением дождя и мокрого снега.

Ранее уже отмечалось, что территория Северо-Запада относится к зоне избыточного увлажнения. Это объясняется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой здесь циклонической деятельностью, которая активно проявляется во все сезоны года.

По данным метеостанции Гдов, Реболы и Старая Русса, видно, что в среднем в год, на рассматриваемой территории выпадает 490 – 670 мм осадков. Годовое количество осадков меняется в направлении с юго-запада на северо-восток. Годовая сумма осадков в районе Ладожского и Онежского озёр не превышает 660 мм. Максимальное количество осадков наблюдается в Ленинградской и Псковской областях (610 – 670 мм).

В течение года осадки распределяются неравномерно. Характер их распределения по территории в теплый и холодный период имеет много общего с годовым, однако в теплый период года влияние возвышенностей на перераспределение осадков более заметно, нежели в холодный. Количество осадков за теплый период (апрель – октябрь) в Карелии колеблется от 370 до 400 мм, на Северо-Западе от 460 до 400 мм.

Осадки холодного периода (ноябрь – март) составляют примерно 53% годовых осадков. За холодный период выпадает 140 – 250 мм осадков. В отдельные годы месячные суммы осадков могут значительно отклоняться в ту или иную сторону от многолетних величин. По метеостанциям Старая Русса, Реболы и Гдов были построены хронологические графики температур воздуха и осадков, представленные на рисунках 1-15.

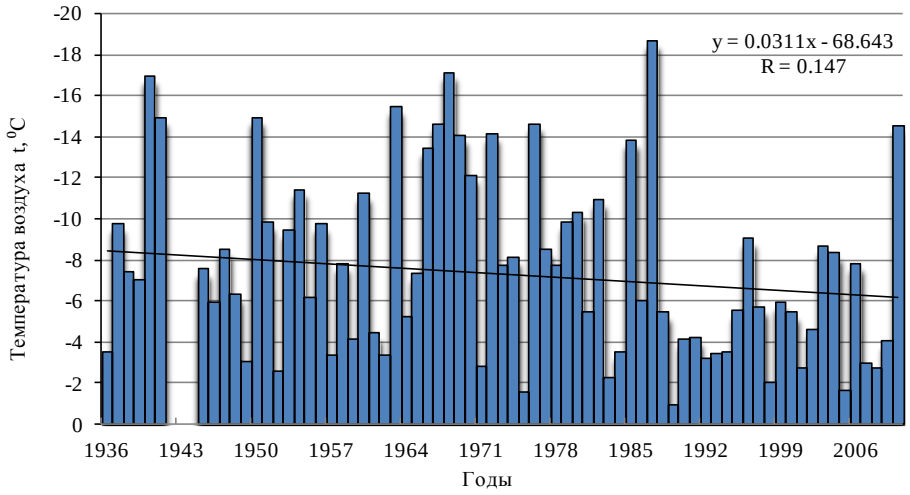


Рисунок 1 – Средняя температура воздуха за январь по станции Старая Русса

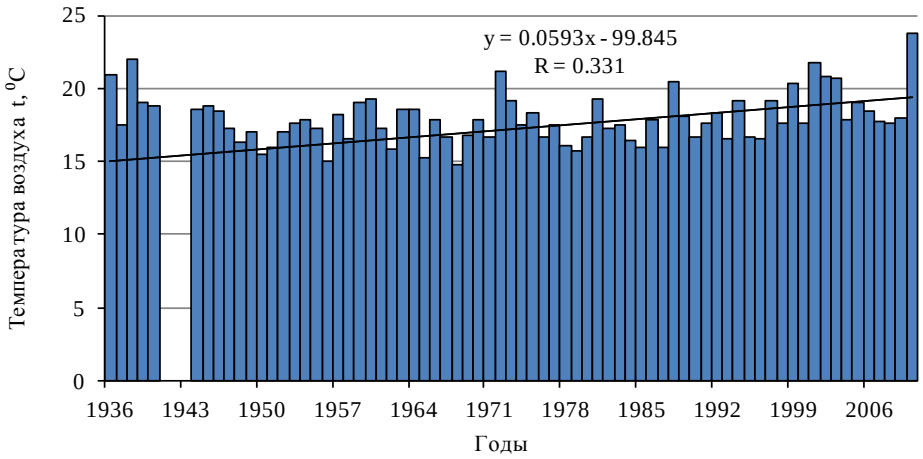


Рисунок 2 – Средняя температура воздуха за июль по станции Старая Русса

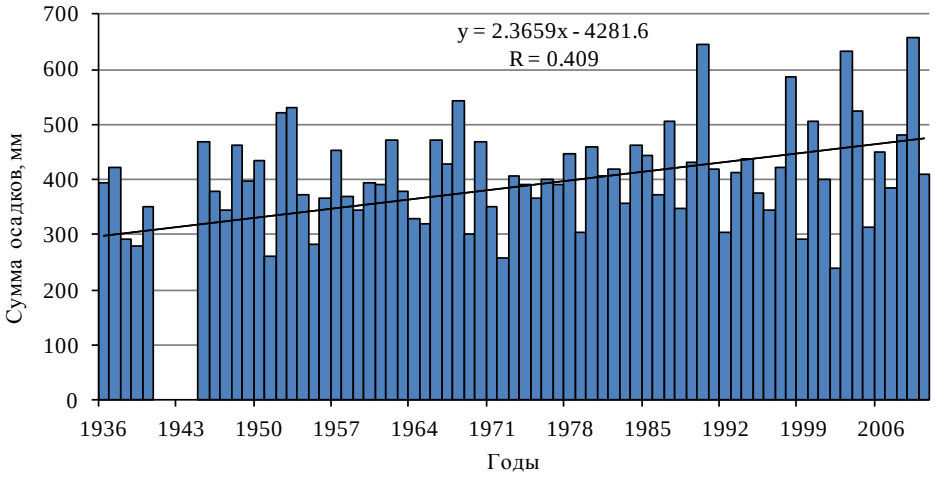


Рисунок 3 – Сумма осадков за теплый период (IV – X) по станции Старая Русса

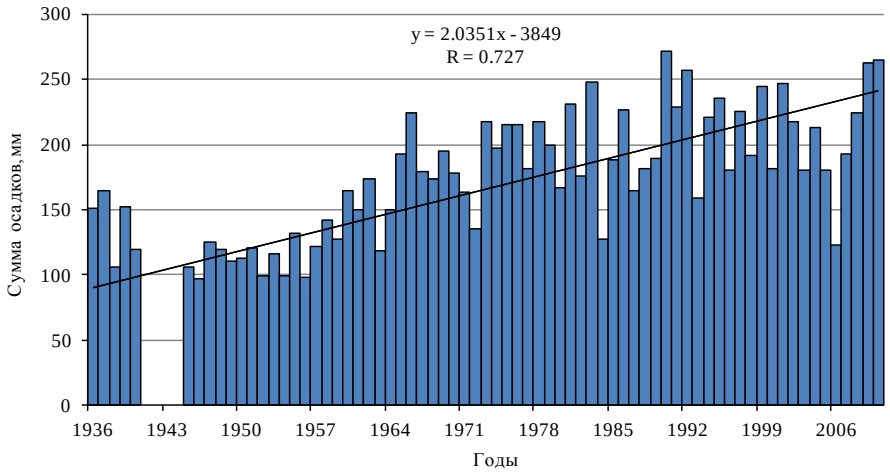


Рисунок 4 – Сумма осадков за холодный период (XI – III) по станции Старая Русса

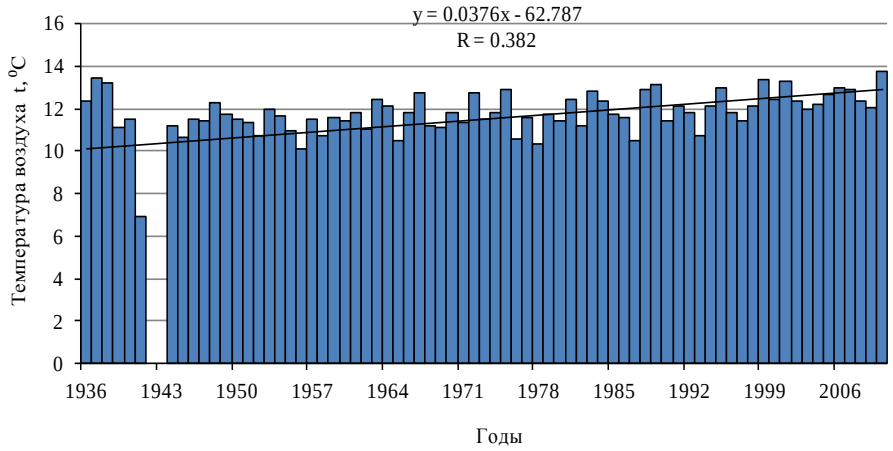


Рисунок 5 – Средняя температура воздуха за теплый период (IV – X) по станции Старая Русса

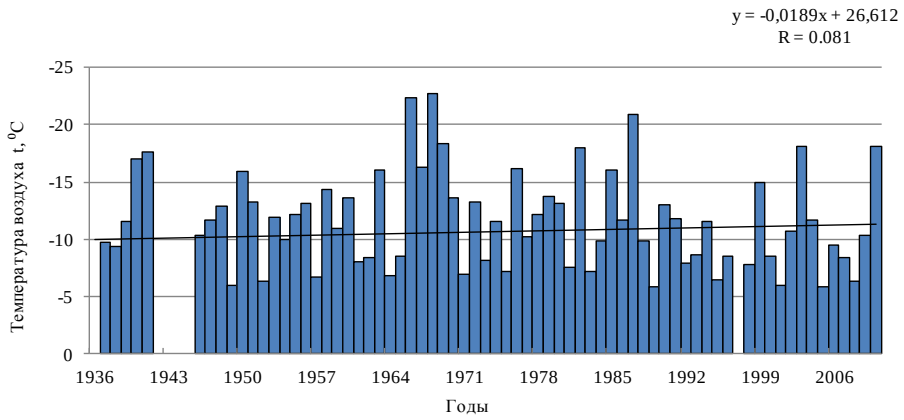


Рисунок 6 – Средняя температура воздуха за январь по станции Реболы

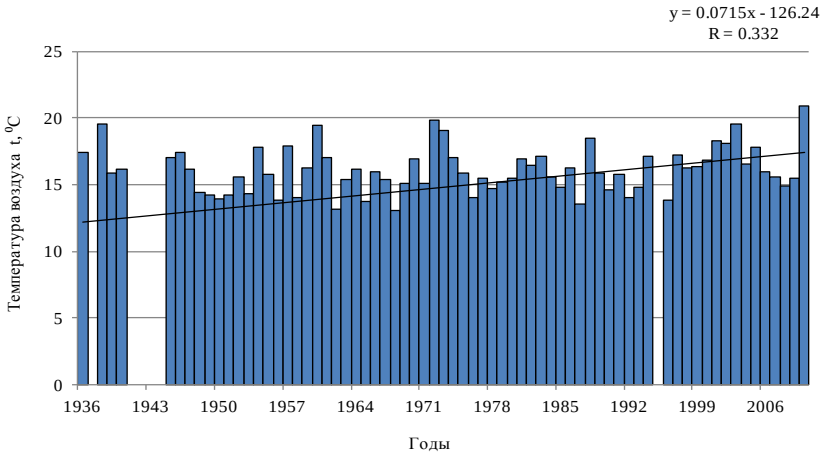


Рисунок 7 – Средняя температура воздуха за июль по станции Реболы

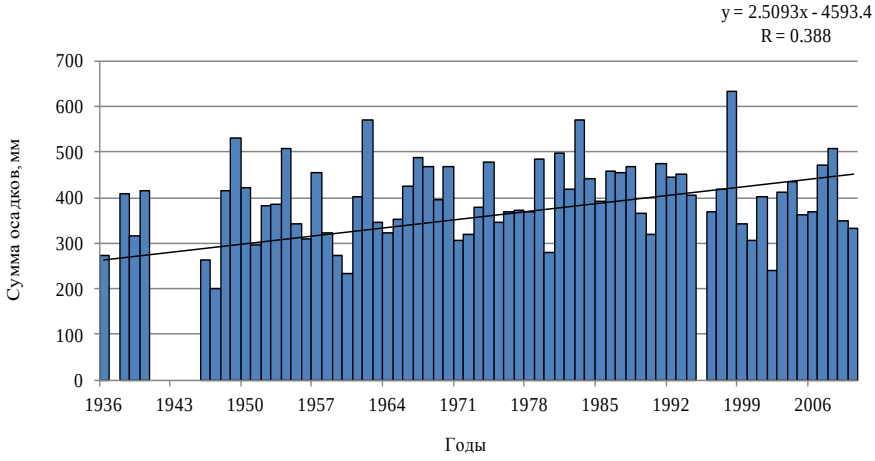


Рисунок 8 – Сумма осадков за теплый период (IV – X) по станции Реболы

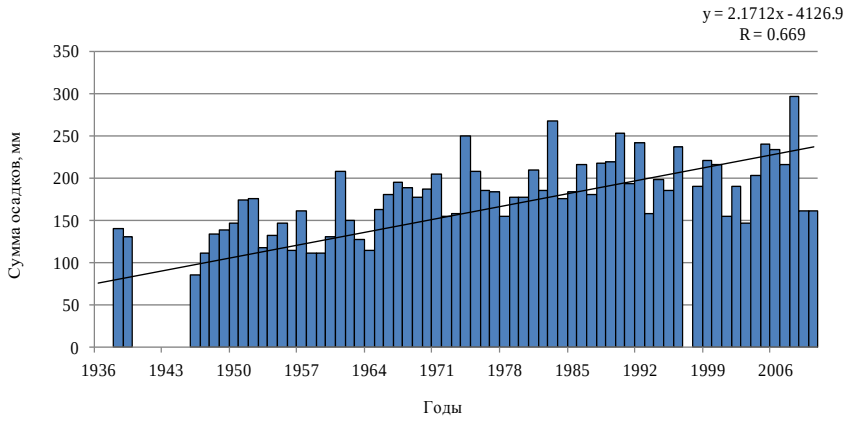


Рисунок 9 – Сумма осадков за холодный период (XI – III) по станции Реболы

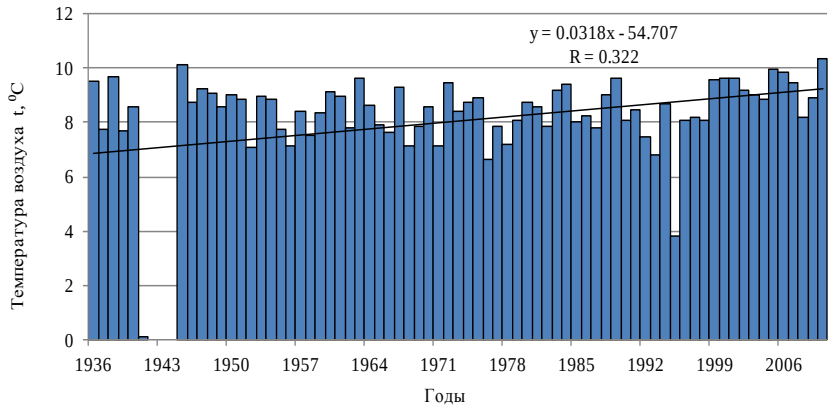


Рисунок 10 – Средняя температура воздуха за теплый период (IV – X) по станции Реболы

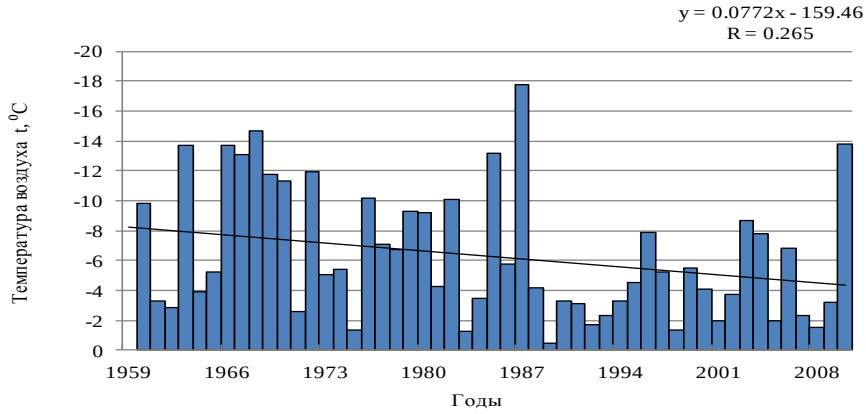


Рисунок 11 – Средняя температура воздуха за январь по станции Гдов

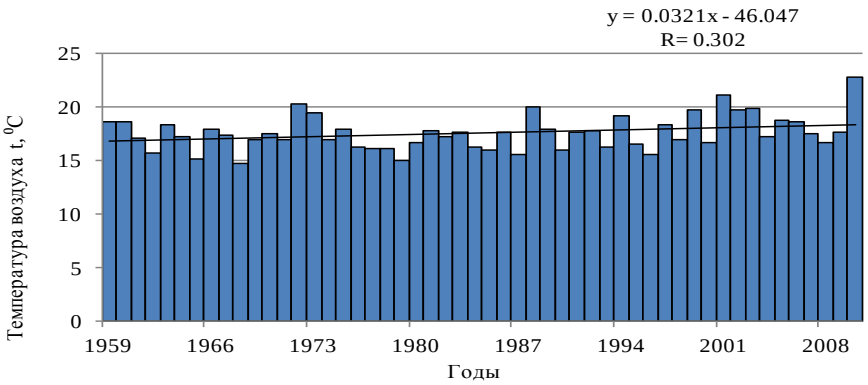


Рисунок 12 – Средняя температура воздуха за июль по станции Гдов

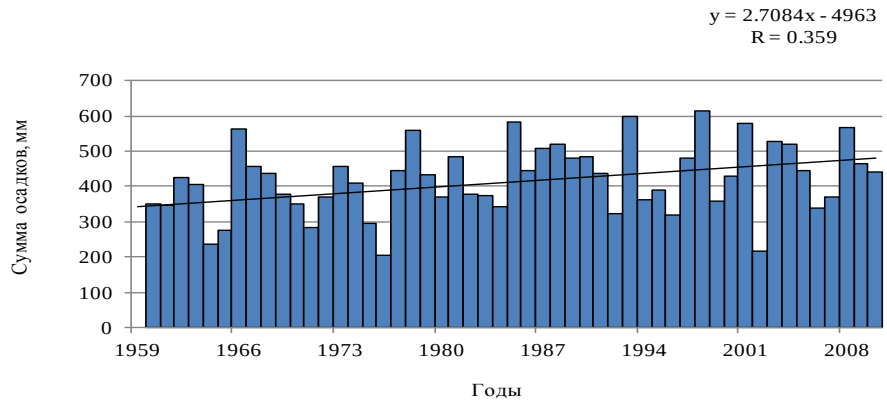


Рисунок 13 – Сумма осадков за теплый период (IV – X) по станции Гдов

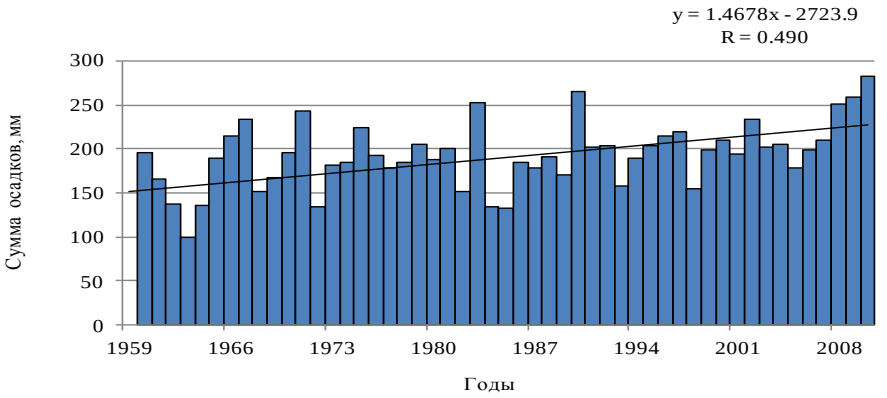


Рисунок 14 – Сумма осадков за холодный период (XI – III) по станции Гдов

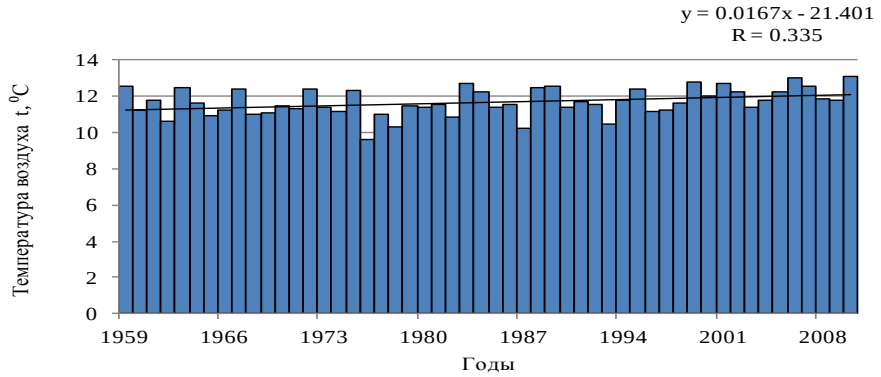


Рисунок 15 – Средняя температура воздуха за теплый период (IV – X) по станции Гдов

Линейные тренды, показанные на графиках, позволяют в первом приближении оценить изменение суммарных осадков в теплый и холодный периоды года, а также температуру воздуха в эти периоды. Значимость трен-

дов оценивалась по соотношению коэффициента корреляции R и его среднеквадратической погрешности σ_R при уровне значимости $2\alpha = 5$ %:

$$\sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{n-1}}$$

где R - коэффициент корреляции

n - число членов ряда

При соотношении $R/\sigma_R \geq 2$ тренд признавался значимым. Цветом отмечены статистически значимые тренды.

Оценка линейных трендов рядов температуры воздуха в самый теплый и холодный месяцы представлена в таблице 2.1, средней за теплый период года в таблице 2.2, а оценка трендов рядов суммарных осадков за теплый и холодный периоды в таблице 2.3

Таблица 2.1 – Оценка линейных трендов рядов температуры воздуха за самый теплый и холодный месяцы года по данным метеостанций региона

Метеостанция	Июль			Январь		
	R	σ_R	R/σ_R	R	σ_R	R/σ_R
Старая Русса	0,331	0,106	> 2	0,147	0,117	< 2
Реболы	0,332	0,109	> 2	0,081	0,121	< 2
Гдов	0,302	0,129	> 2	0,265	0,133	< 2

Таблица 2.2 – Оценка линейных трендов рядов средней температуры воздуха за теплый период по данным метеостанций региона

Метеостанция	Теплый период (IV – X)		
	R	σ_R	R/σ_R
Старая Русса	0,382	0,101	> 2
Реболы	0,322	0,107	> 2
Гдов	0,335	0,126	> 2

Таблица 2.2 – Оценка линейных трендов рядов суммарных осадков за теплый и холодный период года по данным метеостанций региона

Метеостанция	Апрель-октябрь			Ноябрь-март		
	R	σ_R	R/σ_R	R	σ_R	R/σ_R
Старая Русса	0,409	0,100	>2	0,727	0,06	>2
Реболы	0,388	0,104	>2	0,669	0,007	>2
Гдов	0,359	0,124	>2	0,490	0,109	>2

Анализ климатических характеристик, определённых за период наблюдений, включающий последние годы (по 2010 г) по всем трем метеостанциям показал значимость линейных трендов в рядах температуры воздуха в самый теплый месяц года (июль), суммарных осадков и средней температуры воздуха в теплый период года, суммарных осадков в холодный период года.

3 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ

В водном режиме рек выделяется две основные фазы – периоды большой водности в форме половодья и паводков и относительно устойчивые периоды малой водности, так называемый «меженный период». Речной сток в период относительно малых, устойчивых по величине расходов воды называют меженным. Устойчивые расходы воды – это расходы значительно меньше паводочных. В гидрологии под понятием «меженный сток» понимается сток рек, наблюдаемый в период, характеризующийся продолжительным (сезонным) стоянием низких уровней и расходов воды в реке, когда питание ее происходит в основном за счет подземных вод при сильном уменьшении или прекращении поверхностного стока. Меженный период наблюдается в зимний или летне-осенний сезон.

Наименьший сток в реке, наблюдавшийся в меженный период называется минимальным стоком. Под продолжительностью минимального стока имеется в виду наименьший суточный, или декадный, или месячный сток в данном сезоне или в году.

Время начала и конца меженного периода может меняться по длине реки. Если большая река и густая речная сеть на водосборе, тогда будет видна большая разница в датах на главной реке и ее притоках.

Климатические условия на территории России разные, поэтому меженные периоды могут быть продолжительными и короткими, устойчивыми и прерывистыми. Стоит считать меженный период продолжительным, если он больше 30 суток, и коротким, если 10 - 30суток. Если меньше 10 суток период, то его нельзя называть меженным, так как он равен времени добегания паводковых вод на средних реках.

Наблюдается тесная связь продолжительности периода и величины меженного стока с физико–географическими факторами. Выделяются две

группы факторов: климатические факторы, факторы подстилающей поверхности и антропогенные факторы.

Климатические условия играют важную роль в формировании общей водности. Осадки увеличивают грунтовые воды, тем временем испарение уменьшает их питание и запасы. В зоне избыточного увлажнения, там где много осадков и небольшое испарение, малые реки имеют сток в течении всего года, за исключением очень засушливых лет. В зоне недостаточного увлажнения, наоборот мало осадков, но велико испарение, поэтому даже средние реки чуть не каждый год пересыхают.

В летне-осенний сезон важнее всего не температура воздуха, как в зимний период, а испарение и связанный с ним дефицит влажности воздуха. С увеличением дефицита влажности увеличивается и испарение с земной поверхности. Это приводит к уменьшению питания подземными водами и увеличению их расхода на испарение, что влечет к сокращению меженного стока и к тому же минимального стока рек. В засушливых районах наблюдается наибольшее значение дефицита влажности.

Наземные и подземные аккумуляторы являются регулятором стока, от которых зависит величина меженного стока. К наземным регуляторам стока в естественных условиях относятся озера, болота и хорошо развитые поймы.

Большое количество озер в бассейне реки влечёт за собой равномерное распределение стока в течение межени и величина его возрастает.

Влияние болот на меженный сток исследовано не полностью, так как это зависит от физико-географических данных и от климатических факторов. Лес тоже несет действие на меженный сток и его трудно выделить, особенно в одной климатической зоне. В отдельной лесной зоне на территории с недостатком леса (после его уничтожения) сохраняются лесные почвы, и отсюда возникает пополнение подземных вод. Несомненно, лес преобразует поверхностные воды в подземные и, следовательно, увеличивается речной сток в период, когда реки питаются большей частью подземными водами. Были проведены исследования О.И.Крестовским и в конечном итоге сделали вывод

о том, что меженный сток понижается до 15% на средних реках и до 35% на малых реках по причине обезлесения. В лесостепной зоне лес воздействует сильно на минимальный сток, так как различная инфильтрация воды в лесных и степных почвах.

На территории с широко развитой гидрографической сетью отмечается сравнительно высокий минимальный сток. Более обширная территория и развитая речная сеть влечет за собой участие поверхностных вод, образовавшихся дождями, в питании рек в период межени. Это редко можно увидеть на гидрографе стока, потому что осадки выпадают неравномерно и время добегание вод до замыкающего створа приводит к неизмеримому распластыванию паводков.

Иногда развитая пойма реки может оказывать воздействие на низкий сток. Поймы удерживают воду в понижениях в весенний период и затем помогают переводу в подземные аллювиальные воды. На горных территориях места сложенные водопроницаемыми породами накапливают воду в паводки и отдают ее в межень.

Озера влияют очень хорошо на режим речного стока. Большое количество озер и крупность их влияет на равномерное распределение стока в течение всего года. Рассматривая один район у неозерных рек ниже минимальный сток, чем у озерных рек. Озера, расположенные в зоне недостаточного увлажнения снижают величину минимального стока. В таком случае накапливающие в них поверхностные воды тратятся на испарение летом и ледообразование зимой, не участвуя в питании рек.

Рассматривая условные факторы, важное место имеет глубина эрозионного вреза. Если имеется гидравлическая связь водоносных горизонтов с рекой, то выход подземных вод осуществляется через смоченный периметр русла. Получается чем больше периметр, тем больше воды поступает в реку. Возрастание глубины эрозионного вреза русла в водоносные пласты увеличивает смоченный периметр русла. Вместе с тем рост глубины по длине реки служит вскрытию дополнительных водоносных горизонтов. Прорезая гори-

зонт в верховьях, река начинает ниже по течению дренировать ещё несколько горизонтов подземных вод, увеличивая размеры подземного бассейна. Если река начинает дренировать горизонты, где мало воды или горизонты с обратным уклоном, то увеличение глубины вреза русла служит источником маленького удельного подземного притока.

Следовательно, глубина эрозионного вреза русла носит важный характер в изучении минимального стока. Определение этой характеристики связано с необходимостью установления связи между отметкой вреза и отметками водоносных горизонтов, участвующих в питании реки по всей ее длине до замыкающего створа, потому как глубина вреза меняется с увеличением мощности реки.

Для определения глубины эрозионного вреза русла сталкиваются с затруднениями на практике. Эта характеристика в данном створе не может показывать условия дренирования рекой водоносных горизонтов по всему бассейну или хотя бы по главной реке. Желательно чтоб была средневзвешенная или средняя глубина эрозионного вреза русловой сети данного бассейна. Методика определения еще не освоена полностью, но предполагается заменить глубину вреза отметкой вреза в створе реки, иначе абсолютной отметкой дна русла водотока в расчетном створе. Это не есть хорошо, так как при одинаковой абсолютной отметке вреза и при непохожих высотных отметках дренируемых водоносных пластов дренирование их будет различное, а это приведет к разному стоку в реку. На практике, исследуя связи минимального стока с отметкой вреза русла, достаточно тесные связи наблюдаются лишь для отдельных однородных по гидрогеологическим условиям и высотному положению районов.

Глубина эрозионного вреза русла может увеличиваться только до определенного предела – местного базиса эрозии. Поэтому глубина эрозионного вреза имеет значение лишь для определенного диапазона рек и не является общим фактором, подходящим для исследований минимального стока произвольных по размеру рек.

Имеется однозначно связь между площадью бассейна реки и глубиной ее эрозионного вреза, которую установили ещё А.М.Норватов и К.П.Воскресенский. Чем больше площадь бассейна реки, тем значительнее глубина ее эрозионного вреза. Эта связь должна иметь криволинейный характер и затухать при определенных размерах площади бассейна. Характеристики зимнего и летне-осеннего меженного периодов рек Северо-Запада

Рассматривая территорию Северо-Запада, минимальный сток на реках формируется в основном за счет подземных и дополнительно за счет поверхностных вод. В летний период минимальный сток наблюдается на реках Северо-Запада.

Для рек рассматриваемой территории характерна летне-осенняя межень, нарушаемая отдельными подъемами, вызванными дождями, и зимняя межень, прерываемая в отдельные годы подъемами уровней за счет таяния снега во время оттепелей.

Наиболее раннее начало летне-осенней межени (1-я декада июня) и наибольшая ее продолжительность (107-120 дней) отмечаются в южной части территории, в бассейнах рек Ловати и Великой; более позднее наступление межени (конец июня) и наименьшая ее продолжительность (64 – 87 дней); наблюдается на северо-востоке территории, в бассейнах рек Паши и Оять.

На реках Оредеже (пгт Вырица) и Хревице (с. Ивановская) вследствие совместного регулирующего влияния карста и хозяйственной деятельности человека продолжительность возрастает до 156 дней.

Величина среднего слоя стока за межень варьируется от 2 до 105 мм. Наибольшие слои (40мм) наблюдаются на зарегулированных реках В среднем же по территории слой стока равен 20-30 мм. Наименьшие слои (2-16мм) наблюдаются в Приильменской низменности.

Межень завершается обычно в конце марта, на северо-востоке территории – в начале апреля; крайние сроки – конец февраля, середина апреля.

Пересыхание рек на рассматриваемой территории имеют тесное распространение. Почти каждый год наблюдается отсутствие стока лишь на ручьях и логах с очень малыми площадями водосборов (до 0,5 км^2).

Река Кересть - единственная река, на которой при значительной площади водосбора (933 км^2) имели место случаи отсутствия стока.

Следовательно, пересыхания наблюдаются в самой пониженной центральной части Северо-Запада, где уклоны рек малы, сток замедлен и подземное питание незначительно.

4 АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

4.1 Гидрологическая изученность

В данной работе рассматриваются ряды минимального летне-осеннего 30-суточного стока рек Северо-Запада. Всего было использовано 73 поста, число наблюдений, которых составляет от 25 до 76 лет. Самая маленькая площадь водосбора составила 48,3 км^2 (р. Лонница – Мосолино), а самая большая площадь водосбора на реке Мста – д. Девкино – 22500 км^2.

Карта-схема расположения гидрологических постов представлена на рисунке 16; в таблице 4.1 – гидрографические характеристики рек, данные наблюдений по которым использовались в расчетах.

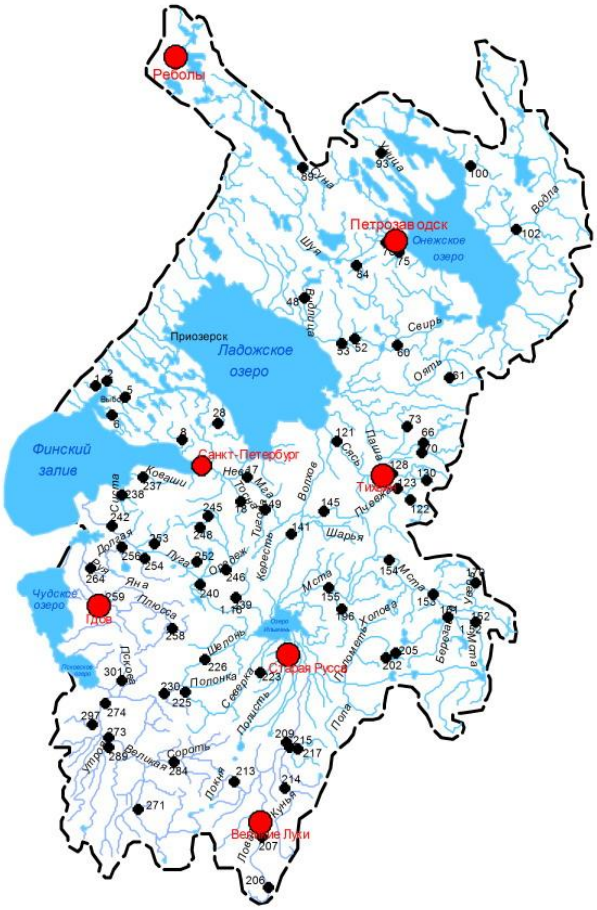


Рисунок 16 – Карта-схема расположения гидрологических постов

Таблица 4.1 – Гидрографические характеристики рек СЗ РФ

№ по МДС	Код	Река	Пункт	A, км^2	L, км	I, ‰	$H_{ср.}$, *м*	fоз., %	fб., %	fл., %
1	72002	Селезневка	Лужайка	486	44	24.2	61	4	3	84
2	72004	Петровка	Дружноселье	78.6	11	28.8	47	2	<1	78
5	72007	Перовка	Гончарово	257	50	13.1	43	2	7	79
6	72008	Гороховка	Токарево	700	24	23	42	9	3	68
8	72016	Сестра	Белоостров	390	68	22,5	84	1	6	78
17	72039	Мга	Горы	709	83	7,7	48	<1	14	69
18	72043	Тосна	Тосно	1300	85	-	54	1	12	75
28	72064	Авлога	Матокса	89,1	24	12,4	75	2	2	70
48	72104	Видлица	Большие Горы	977	73	22,0	95	11	9	80
52	72113	Мегрега	Куйтежа	381	51	20,1	98	2	8	90
53	72114	Мегрега	Судалица	1000	75	15,9	60	1	15	84
60	72142	Яндеба	Яндеба	280	37	24,8	125	3	6	88
61	72144	Оять	Мининская	693	68	26,0	217	2	10	80
66	72154	Паша	Поречье	1110	56	1,75	169	1	10	75
70	72158	Явосьма	Ушаково	742	34	1,49	170	5	17	73
73	72162	Капша	Еремина Гора	1560	150	-	160	3	5	82
75	48006	Лососинка	Петрозаводск	276	36	32.0	215	7	10	83
78	48021	Шуя	Бесовец	9560	267	-	146	10	19	71
84	48030	Святрека	Пряжа	355	34	33.5	181	8	16	86
89	48038	Суна	Поросозеро	3370	125	-	201	14	18	68
93	48055	Уница	Уница	340	53	30.0	123	3	10	82
100	48071	Пяльма	Пяльма	908	71	18.0	137	2	10	88
102	48079	Водла	Харловская	12000	364	-	149	6	24	70
121	72169	Сясь	Яхново	6230	233	0,93	96	1	18	65
122	72172	Воложба	Пареево	644	62	21,8	180	2	5	66
123	72173	Воложба	Воложба	1330	73	1,68	149	1	11	71
128	72188	Тихвинка	Горелуха	2070	128	1,13	108	1	13	66
130	72192	Дымка	Домачево	112	28	20,1	112	<1	14	75
141	72227	Кересть	Сябреницы	833	73	3,1	45	<1	7	77
145	72239	Пчевжа	Белая	1690	113	-	67	<1	13	76
149	72246	Тигода	Любань	589	57	4,7	50	<1	14	80
152	72259	Мста	Берез. Рядок	5180	55	-	206	5	7	58
153	72269	Мста	Потерпелицы	13200	307	-	185	5	9	56
154	72276	Мста	Бор	16900	224	-	174	4	8	58
155	72281	Мста	Девкино	22500	361	-	154	3	9	62
161	72305	Березайка	Устье	3030	121	-	187	6	11	60
170	72327	Уверь	Меглецы	1750	125	-	171	2	14	57
196	72409	Холова	Горбуново	1500	92	-	93	<1	1	75
202	72432	Полометь	Дворец	432	55	22,5	207	3	4	81
205	72441	Лонница	Мосолино	48,3	17	25,2	220	<1	7	88
206	72450	Ловать	Узкое	398	41	3,8	169	3	1	28
207	72454	Ловать	Великие Луки	3270	175	-	162	6	<1	40
209	72459	Ловать	Холм	14700	337	-	140	2	4	51
213	72467	Локня	Бородино	398	73	32,5	162	2	3	23
214	72477	Кунья	Уварово	2480	166	-	149	<1	1	63

Продолжение табл. 4.1

№ по МДС	Код	Река	Пункт	A, км^2	L, км	I, ‰	$H_{ср.}$, *м*	*f*оз., %	*f*б., %	*f*л., %
215	72478	Кунья	Холм	5140	233	-	142	1	2	66
217	72481	Б.Тудер	Бабяхтино	871	93	2.0	135	<1	2	68
223	72504	Перехода	Подсосонье	138	23	7,0	85	0	3	30
225	72508	Шелонь	Порхов	2950	120	-	94	<1	15	30
226	72510	Шелонь	Заполье	6820	189	-	86	1	20	26
230	72518	Уза	Дубская	515	70	20,0	132	3	0	35
237	72552	Коваши	Лендовщина	505	56	12,6	78	<1	4	60
238	72559	Систа	Ср. Райково	573	68	16,6	92	<1	3	77
239	72564	Луга	Воронино	864	50	2,4	58	1	19	53
240	72566	Луга	Луга	2330	131	-	62	2	8	54
242	72577	Луга	Кингисепп	12800	293	-	73	2	8	61
245	72588	Оредеж	Вырица	920	70	7,0	110	<1	4	59
246	72589	Оредеж	Моровино	3060	158	-	80	<1	10	63
248	72592	Орлинка	Орлинка	206	34	10,6	95	1	6	66
252	72603	Ящера	Долговка	581	66	9,2	79	<1	20	73
253	72605	Лемовжа	Хотнежа	948	57	9,4	106	<1	6	75
254	72609	Саба	Райково	1280	83	-	64	2	10	68
256	72614	Долгая	Загорье	777	85	10,8	64	5	14	56
258	72623	Плюсса	Плюсса	1440	54	-	86	1	16	52
259	72625	Плюсса	Брод	5090	169	-	82	1	11	59
264	72643	Руя	Малые Рожки	219	30	14,3	72	<1	6	73
271	72654	Великая	Опочка	3500	205	-	167	6	<1	56
273	72660	Великая	Гуйтово	13400	336	-	127	3	2	40
274	72661	Великая	Пятоново	20000	392	-	119	2	2	36
284	72682	Сороть	Осинкино	3170	80	-	123	2	2	30
289	72696	Утроя	Большая Губа	2970	182	-	110	2	4	23
297	72716	Кудеб	Свериково	739	68	8,5	131	1	4	38
301	72727	Пскова	Черняковицы	914	90	2,2	107	1	4	49

4.2 Оценка трендов в рядах минимальных 30-суточных расходов воды

На рисунках 17 – 22 представлены хронологические графики минимальных 30-суточных расходов воды по постам ближайшим к опорным метеостанциям Гдов, Реболы и Старая Русса.

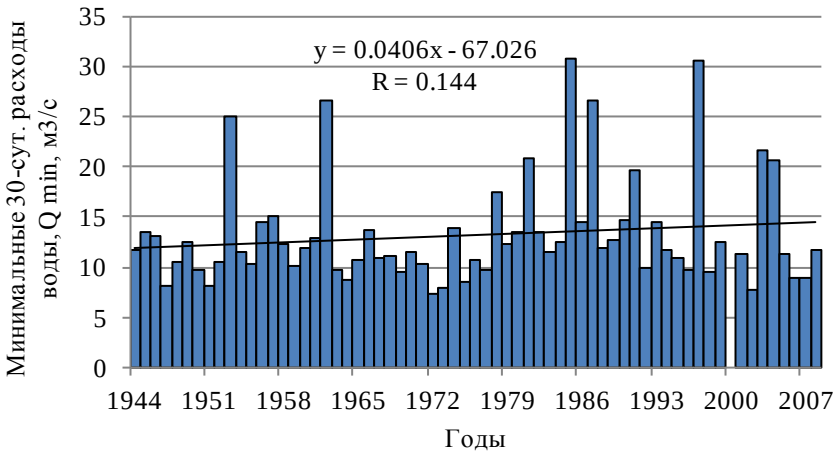


Рисунок 17 – Минимальные 30-суточные расходы воды в пункте Плюсса – Брод

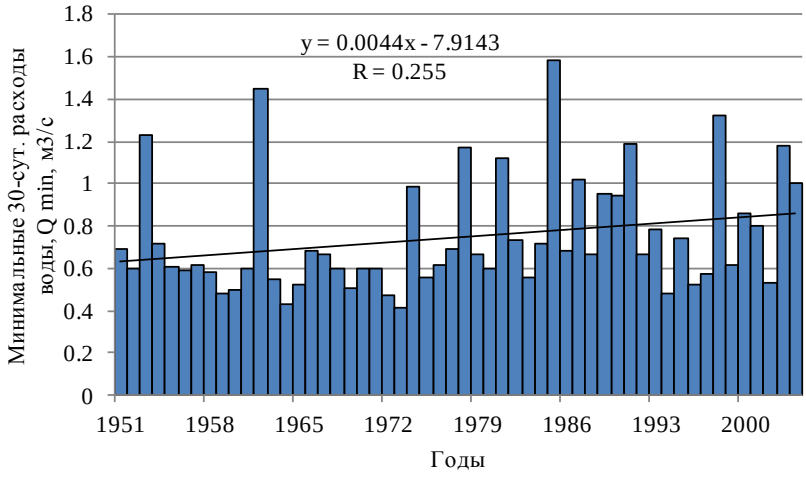


Рисунок 18 – Минимальные 30-суточные расходы воды в пункте Руя – Малые Рожки

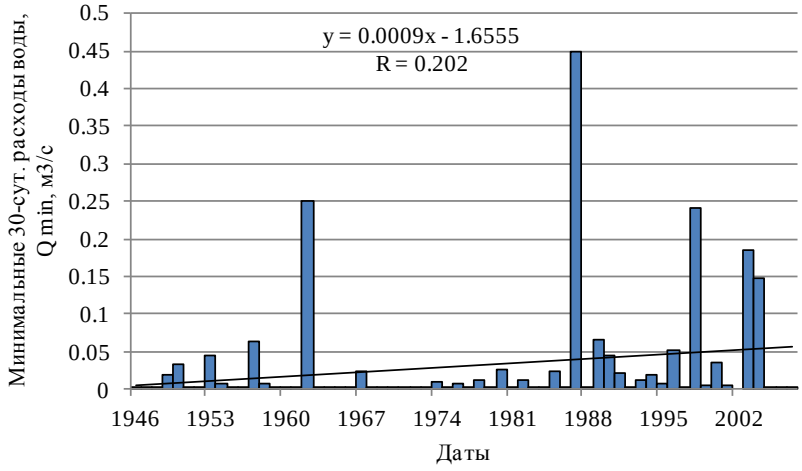


Рисунок 19 – Минимальные 30-суточные расходы воды в пункте Перехода – Подсосонье

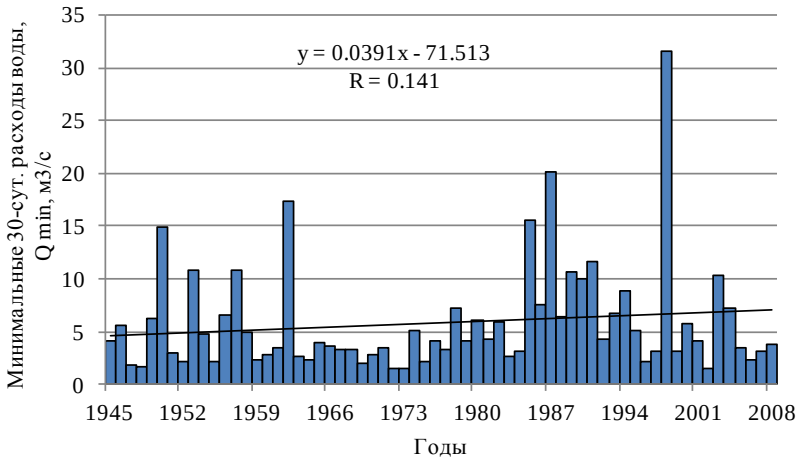


Рисунок 20 – Минимальные 30-суточные расходы воды в пункте Шелонь – Заполье

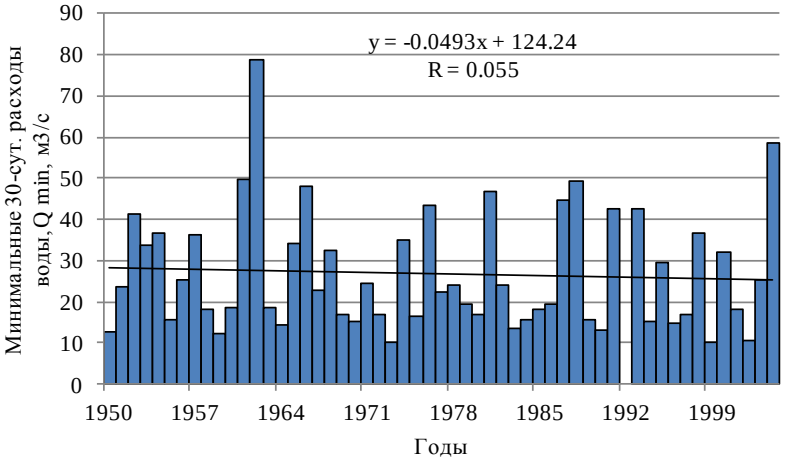


Рисунок 21 – Минимальные 30-суточные расходы воды в пункте Суна – Поросозеро

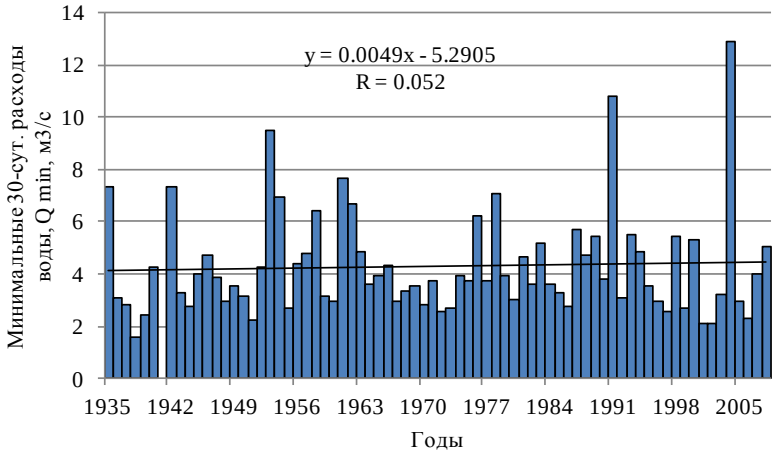


Рисунок 22 – Минимальные 30-суточные расходы воды в пункте Паша – Поречье

По линейным трендам можно в первом приближении оценить изменение минимального стока в рассматриваемый период. Значимость трендов оценивалась по соотношению коэффициента корреляции R и его среднеквадратической погрешности σ_R при уровне значимости $2\alpha = 5$ %:

При соотношении $R/\sigma_R \geq 2$ тренд являлся значимым.

Оценка линейных трендов в рядах минимального стока рек СЗ РФ представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка линейных трендов в рядах минимального стока

Река – Пункт	R	σ_R	R/σ_R
Плюсса – Брод	0,144	0,124	< 2
Руя – Малые Рожки	0,255	0,130	< 2
Перехода – Подсосонье	0,202	0,124	< 2
Шелонь – Заполье	0,141	0,124	< 2
Суна – Поросозеро	0,055	0,138	< 2
Паша – Поречье	0,052	0,118	< 2

Анализ минимального стока рек СЗ РФ не показал значимости линейных трендов в рядах минимальных 30-суточных расходов воды. Увеличение суммарных осадков в теплый период года по данным метеостанций исследуемого района не оказывает заметного влияния на увеличение стока в период летне-осенней межени, поскольку увеличение температуры воздуха в этот же период приводит к увеличению испарения, в свою очередь приводящему к уменьшению стока.

4.3 Проверка рядов на однородность

Для проверки рядов на однородность в работе использовались рекомендуемые СП 33-101-2003 параметрические критерии – Стьюдента и Фишера при уровне значимости $2\alpha = 5$ %.

Критерий Стьюдента используется для проверки однородности гидрологических рядов по среднему значению. Исходный ряд делится на две части (две выборки). Если дата возможного нарушения стока не известна, ряд делится пополам. Затем вычисляется эмпирическое значение статистики Стьюдента. Если при принятом уровне значимости оказывается, что эмпирическое значение меньше теоретического ($t^* < t$), то гипотеза об однородности ряда по среднему значению не опровергается.

Критерий Фишера используется для проверки однородности гидрологических рядов по дисперсии. Исходный ряд делится на две части, затем оцениваются дисперсии для каждой из частей ряда и вычисляется эмпирическое значение статистики Фишера $F^* = \frac{D_1}{D_2}$, где $D_1 > D_2$.

Полученное эмпирическое значение F* сравнивается с теоретическим значением F. Если при принятом уровне значимости оказывается, что $F^* < F$, то расхождение дисперсий считается незначимым и гипотеза об однородности ряда по дисперсии не опровергается.

Проверив ряды минимального летне-осеннего 30-суточного стока на однородность, получили результаты, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты проверки рядов минимального 30-суточного летне-осеннего стока рек Северо-Запада РФ на однородность

Код	Река	Пункт	t*	t(2a)	Но	F*	F(2a)	Но
72002	Селезневка	Лужайка	-2.11	2.01	+	1.08	2.27	+
72004	Петровка	Дружноселье	-0.31	2.00	+	1.30	2.10	+
72007	Перовка	Гончарово	-1.17	2.00	+	1.81	2.07	+
72008	Гороховка	Токарево	-0.49	2.00	+	1.08	2.10	+
72016	Сестра	Белоостров	-1.35	2.01	+	1.01	2.27	+
72039	Мга	Горы	-0.84	2.00	+	2.64	2.02	-
72043	Тосна	Тосно	-0.44	2.00	+	4.41	2.04	-
72064	Авлога	Матокса	-1.10	2.02	+	5.00	2.36	-
72104	Видлица	Большие Горы	2.13	2.00	-	1.59	2.13	+
72113	Мегрега	Куйтежа	-0.53	2.00	+	1.25	2.11	+
72114	Мегрега	Судалица	0.34	2.07	+	2.35	3.32	+
72142	Яндеба	Яндеба	-0.20	2.00	-	1.30	2.06	+
72144	Оять	Мининская	0.39	2.00	+	1.11	2.05	+
72154	Паша	Поречье	-0.48	1.99	+	1.53	1.95	+
72158	Явосьма	Ушаково	-1.34	2.00	+	2.24	2.13	-

Продолжение табл. 4.3

Код	Река	Пункт	t*	t(2a)	Но	F*	F(2a)	Но
72162	Капша	Еремина Гора	-0.56	2.01	+	2.09	2.17	+
48006	Лососинка	Петрозаводск	2.47	2.01	-	1.30	2.18	+
48021	Шуя	Бесовец	-0.20	2.00	+	1.23	2.10	+
48030	Святрека	Пряжа	1.04	2.00	+	1.93	2.13	+
48038	Суна	Поросозеро	0.53	2.01	+	1.30	2.19	+
48055	Уница	Уница	-0.33	2.01	+	1.18	2.18	+
48071	Пяльма	Пяльма	1.13	2.01	+	2.31	2.26	-
48079	Водла	Харловская	-0.32	2.00	+	1.51	2.09	+
72169	Сясь	Яхново	-1.01	2.00	+	1.20	2.09	+
72172	Воложба	Пареево	-3.27	2.00	+	2.48	2.14	-
72173	Воложба	Воложба	-3.06	1.99	+	2.29	1.95	-
72188	Тихвинка	Горелуха	-1.70	1.99	+	1.14	1.95	+
72192	Дымка	Домачево	-5.23	2.00	+	1.44	2.11	+
72227	Кересть	Сябреницы	-0.84	2.00	+	2.26	2.07	-
72239	Пчевжа	Белая	-1.55	2.00	+	2.34	2.02	-
72246	Тигода	Любань	0.19	2.00	+	1.95	2.03	+
72259	Мста	Березовск. Рядок	-1.37	2.00	+	1.51	2.02	+
72269	Мста	Потерпелицы	-2.61	1.99	+	1.66	1.95	+
72276	Мста	Бор	-0.48	2.00	+	1.21	2.16	+
72281	Мста	Девкино	-0.78	1.99	+	1.71	1.93	+
72305	Березайка	Устье	-2.82	2.01	+	1.01	2.36	+
72327	Уверь	Меглецы	-0.73	1.99	+	2.91	1.96	-
72409	Холова	Горбуново	0.42	2.02	+	1.50	2.42	+
72432	Пометь	Дворец	-0.63	2.01	+	1.28	2.31	+
72441	Лонница	Мосолино	1.28	2.04	+	11.5	2.84	-
72450	Ловать	Узкое	-3.67	2.00	+	8.01	2.06	-
72454	Ловать	Великие Луки	-1.95	2.00	+	2.36	2.07	-
72459	Ловать	Холм	-1.16	1.99	+	1.39	1.92	+
72467	Локня	Бородино	-0.56	2.00	+	1.19	2.11	+
72477	Кунья	Уварово	-0.12	2.00	+	1.73	2.16	+
72478	Кунья	Холм	-0.63	2.00	+	1.35	2.13	+
72481	Б.Тудер	Бабяхтино	-0.26	2.00	+	1.76	2.06	+
72504	Перехода	Подсосонье	-1.53	2.00	+	4.24	2.07	-
72508	Шелонь	Порхов	-2.06	2.01	+	1.07	2.22	+
72510	Шелонь	Заполье	-1.93	2.00	+	2.54	2.05	-
72518	Уза	Дубская	-0.58	2.00	+	1.00	2.09	+
72552	Коваши	Лендовщина	-0.23	2.00	+	1.57	2.12	+
72559	Систа	Среднее Райково	-2.26	2.00	+	1.28	2.06	+
72564	Луга	Воронино	1.65	2.02	+	1.37	2.46	+
72566	Луга	Луга	-2.49	2.00	+	3.30	2.06	-
72577	Луга	Кингисепп	-2.75	2.00	+	2.48	2.03	-
72588	Оредеж	Вырица	-3.48	2.00	+	1.37	2.05	+
72589	Оредеж	Моровино	-1.43	2.00	+	2.36	1.98	-
72592	Орлинка	Орлинка	-2.54	2.01	+	1.65	2.17	+
72603	Ящера	Долговка	-1.21	2.00	+	3.95	2.14	-
72605	Лемовжа	Хотнежа	-0.14	2.00	+	1.03	2.23	+
72609	Саба	Райково	-0.64	2.00	+	1.35	2.00	+
72614	Долгая	Загорье	-0.47	2.00	+	1.15	2.11	+

Продолжение табл. 4.3

Код	Река	Пункт	t*	t(2a)	Но	F*	F(2a)	Но
72623	Плюсса	Плюсса	0.58	2.00	+	1.57	2.08	+
72625	Плюсса	Брод	-1.99	2.00	+	2.11	2.05	-
72643	Руя	Малые Рожки	-2.72	2.01	+	1.48	2.19	+
72654	Великая	Опочка	-0.30	2.00	+	1.20	2.10	+
72660	Великая	Гуйтово	-1.55	2.00	+	1.77	2.05	+
72661	Великая	Пятоново	-2.65	2.00	+	5.48	2.05	-
72682	Сороть	Осинкино	-2.22	2.00	+	2.62	2.13	-
72696	Утроя	Большая Губа	-0.94	2.00	+	3.16	2.08	-
72716	Кудеб	Свериково	-1.46	2.01	+	2.37	2.28	-
72727	Пскова	Черняковицы	-1.30	2.01	+	2.39	2.21	-

4.4 Расчет параметров распределения и обеспеченных расходов воды на реках СЗ РФ за период летне-осенней межени

В данной работе представлен расчёт параметров распределения для всех рядов наблюдений, использовавшихся в работе.

При расчете основных статистических характеристик и их погрешностей использовался метод моментов. Этот метод является наиболее распространенным. Расчётные формулы, использовавшиеся в нахождении параметров распределения, представлены ниже.

Среднее значение:

$$\overline{Q} = \frac{\sum_{i-1}^{n} Q_i}{n},$$

где Q_i - значения членов ряда

n - число членов ряда наблюдений

коэффициент вариации:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (k_i - 1)^2}{n-1}},$$

где k_i - модульный коэффициент

коэффициент асимметрии:

$$C_s = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(k_i - 1)^3}{(n-1)(n-2)C_v^3}$$

относительная погрешность среднего значения:

$$\sigma_{Q,\%} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}100\ \%,$$

относительная погрешность коэффициента вариации:

$$\sigma_{Cv} = \frac{C_v}{n + 4C_v^2}\sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2}}$$

относительная погрешность коэффициента асимметрии:

$$\sigma_{Cs,\%} = \frac{1}{C_s}\sqrt{\frac{6}{n}\left(1 + 6C_v^2 + 5C_v^4\right)}100\,\%$$

Если коэффициент вариации (C_v) был больше 0.6, тогда параметры пересчитывались методом наибольшего правдоподобия.

Для определения обеспеченных расходов воды использовалось аналитическая кривая Крицкого –Менкеля.

Результаты расчетов параметров распределения и их относительные погрешности, а также значения расхода воды опорной обеспеченности представлены в таблице 4.4; кривые Крицкого-Менкеля в приложении А.

Таблица 4.4 – Параметры распределения и их погрешности

№ МДС	Река	Пост	n	Qcp	Cv	Cs	Cs/Cv	$\sigma_{Q\%}$	$\sigma_{Cv\%}$	Q80%
1	Селезневка	Лужайка	50	0,850	0,57	0,82	1,44	8,07	11,5	0,405
2	Петровка	Дружноселье	60	0,098	0,74	1,21	1,64	9,54	11,4	0,038
5	Перовка	Гончарово	62	0,716	0,48	1,15	2,37	6,15	9,98	0,423
6	Гороховка	Токарево	60	3,46	0,43	1,26	2,94	5,53	9,93	2,24

Продолжение табл. 4.4

№ МДС	Река	Пост	n	Qcp	Cv	Cs	Cs/Cv	$\sigma_{Q\%}$	$\sigma_{Cv\%}$	Q80%
8	Сестра	Белоостров	50	1,37	0,36	1,39	3,85	5,09	10,6	0,973
17	Мга	Горы	66	0,816	1,08	2,77	2,58	13,3	12,8	0,222
18	Тосна	Тосно	64	0,984	1,09	3,31	3,04	13,6	13,1	0,263
28	Авлога	Матокса	46	0,25	0,45	3,44	7,69	6,60	11,4	0,168
48	Видлица	Большие Горы	58	6,19	0,49	0,81	1,64	6,49	10,4	3,60
52	Мегрега	Куйтежа	59	1,23	0,64	1,38	2,16	8,33	10,9	0,572
53	Мегрега	Судалица	25	2,85	0,51	1,18	2,32	10,2	15,9	1,61
60	Яндеба	Яндеба	63	0,666	0,77	1,51	1,96	9,71	11,3	0,248
61	Оять	Мининская	64	2,09	0,67	0,89	1,33	8,53	10,9	0,774
66	Паша	Поречье	73	4,30	0,47	1,97	4,22	5,45	9,13	2,73
70	Явосьма	Ушаково	58	2,03	0,41	1,52	3,68	5,44	10,1	1,37
73	Капша	Еремина Гора	55	4,40	0,58	1,68	2,90	7,83	11,0	2,38
75	Лососинка	Петрозаводск	55	1,88	0,47	0,63	1,34	6,37	10,6	1,09
78	Шуя	Бесовец	60	46,6	0,57	1,30	2,26	7,42	10,5	24,2
84	Святрека	Пряжа	58	1,34	0,74	1,52	2,07	9,68	11,5	0,526
89	Суна	Поросозеро	54	26,8	0,53	1,28	2,39	7,28	10,9	14,9
93	Уница	Уница	55	1,15	0,77	1,24	1,60	10,4	12,1	0,428
100	Пяльма	Пяльма	51	3,05	0,62	1,34	2,17	8,62	11,6	1,47
102	Водла	Харловская	61	78,2	0,39	0,84	2,12	5,04	9,73	51,8
121	Сясь	Яхново	61	15,2	0,43	1,49	3,49	5,47	9,84	10,0
122	Воложба	Пареево	57	2,99	0,25	1,23	5,01	3,26	9,65	2,36
123	Воложба	Воложба	73	4,23	0,25	1,13	4,58	2,90	8,53	3,34
128	Тихвинка	Горелуха	73	7,01	0,39	1,05	2,69	4,59	8,89	4,75
130	Дымка	Домачево	59	0,360	0,57	0,81	1,44	7,38	10,6	0,171
141	Кересть	Сябреницы	62	0,444	1,81	3,14	1,74	23,0	18,6	0,009
145	Пчевжа	Белая	66	2,38	0,88	2,95	3,35	10,8	11,6	0,868
149	Тигода	Любань	65	0,482	0,88	2,85	3,23	11,0	11,7	0,176
152	Мста	Берез. Рядок	66	7,67	0,48	1,32	2,73	5,95	9,67	4,62
153	Мста	Потерпелицы	73	33,0	0,51	1,56	3,09	5,92	9,28	19,6
154	Мста	Бор	56	42,7	0,49	1,86	3,81	6,54	10,5	26,4
155	Мста	Девкино	75	57,7	0,49	1,64	3,38	5,62	9,08	35,3
161	Березайка	Устье	46	10,3	0,52	1,09	2,10	7,68	11,8	5,75
170	Уверь	Меглецы	72	4,86	0,52	2,77	5,37	6,08	9,38	3,00
196	Холова	Горбуново	43	2,22	0,81	2,92	3,61	12,3	13,9	0,973
202	Пологметь	Дворец	48	0,721	0,95	2,54	2,68	13,7	14,1	0,238
205	Лонница	Мосолино	33	0,05	1,19	2,25	1,89	20,7	19,1	0,007
206	Ловать	Узкое	63	0,551	0,81	1,70	2,11	10,2	11,4	0,190
207	Ловать	Великие Луки	63	6,56	0,64	2,91	4,52	8,12	10,6	3,53
209	Ловать	Холм	76	22,2	0,87	3,27	3,75	10,0	10,8	8,82
213	Локня	Бородино	59	0,584	0,82	2,70	3,32	10,6	11,9	0,232
214	Кунья	Уварово	56	2,56	1,26	3,85	3,04	16,9	15,2	0,521
215	Кунья	Холм	58	8,29	0,89	3,32	3,72	11,7	12,4	3,21
217	Б.Тудер	Бабяхтино	63	1,31	0,82	2,88	3,50	10,4	11,5	0,519
223	Перехода	Подсосонье	62	0,031	2,44	3,96	1,62	31,0	23,7	0,0003
225	Шелонь	Порхов	53	2,00	0,70	2,14	3,04	9,67	11,9	0,93
226	Шелонь	Заполье	64	5,83	0,89	2,73	3,08	11,1	11,8	2,12
230	Уза	Дубская	61	0,569	0,83	1,32	1,59	10,6	11,8	0,188

Продолжение табл. 4.4

№ МДС	Река	Пост	n	Qcp	Cv	Cs	Cs/Cv	$\sigma_{Q\%}$	$\sigma_{Cv\%}$	Q80%
237	Коваши	Лендовщина	59	1,19	0,54	1,44	2,67	7,01	10,5	0,677
238	Систа	Ср. Райково	63	2,52	0,40	1,05	2,62	5,04	9,59	1,69
239	Луга	Воронино	42	0,63	0,81	1,94	2,39	12,6	14,1	0,217
240	Луга	Луга	63	4,57	0,50	2,65	5,34	6,26	9,95	2,88
242	Луга	Кингисепп	65	32,4	0,58	2,19	3,81	7,14	10,1	18,2
245	Оредеж	Вырица	64	4,33	0,32	0,70	2,18	4,01	9,28	3,15
246	Оредеж	Моровино	70	6,41	0,43	2,19	5,08	5,15	9,20	4,31
248	Орлинка	Орлинка	55	0,380	0,56	1,27	2,27	7,55	10,9	0,200
252	Ящера	Долговка	57	0,845	0,70	2,23	3,19	9,26	11,4	0,393
253	Лемовжа	Хотнежа	52	1,52	0,45	2,04	4,57	6,20	10,7	1,00
254	Саба	Райково	68	2,12	0,62	2,14	3,46	7,48	10,1	1,09
256	Долгая	Загорье	59	1,75	0,68	1,87	2,74	8,89	11,2	0,836
258	Плюсса	Плюсса	61	2,49	0,54	2,20	4,06	6,94	10,3	1,47
259	Плюсса	Брод	64	13,2	0,40	1,89	4,71	5,01	9,52	9,10
264	Руя	Малые Рожки	54	0,745	0,36	1,34	3,70	4,94	10,2	0,529
271	Великая	Опочка	60	12,6	0,51	2,11	4,12	6,62	10,3	7,68
273	Великая	Гуйтово	64	28,4	0,53	2,34	4,38	6,67	10,0	17,1
274	Великая	Пятоново	64	36,6	0,61	3,04	4,96	7,67	10,4	20,6
284	Сороть	Осинкино	58	4,93	0,71	2,36	3,30	9,38	11,4	2,30
289	Утроя	Большая Губа	61	3,32	0,70	2,54	3,64	8,94	11,0	1,61
297	Кудеб	Свериково	49	1,04	0,71	2,59	3,66	10,1	12,4	0,510
301	Пскова	Черняковицы	53	1,30	0,73	1,91	2,61	10,1	12,0	0,582

В 77 % случаев относительные погрешности среднего не выходят за допустимые рамки 10 % и в 93 % случаев погрешности коэффициента вариации не выходят за 15 %. Параметры распределения этих рядов использовались для расчета ординат аналитической кривой Крицкого-Менкеля.

5 РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК СЗ РФ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

5.1 Построение карты изолиний 80%-го модуля стока для средних рек

По данным наблюдений на средних реках СЗ РФ (21 пост в период с 1930 по 2008 гг.) постороена карта изолиний 80 %-го модуля стока периода летне-осенней межени. Карта приводится на рисунке 23.

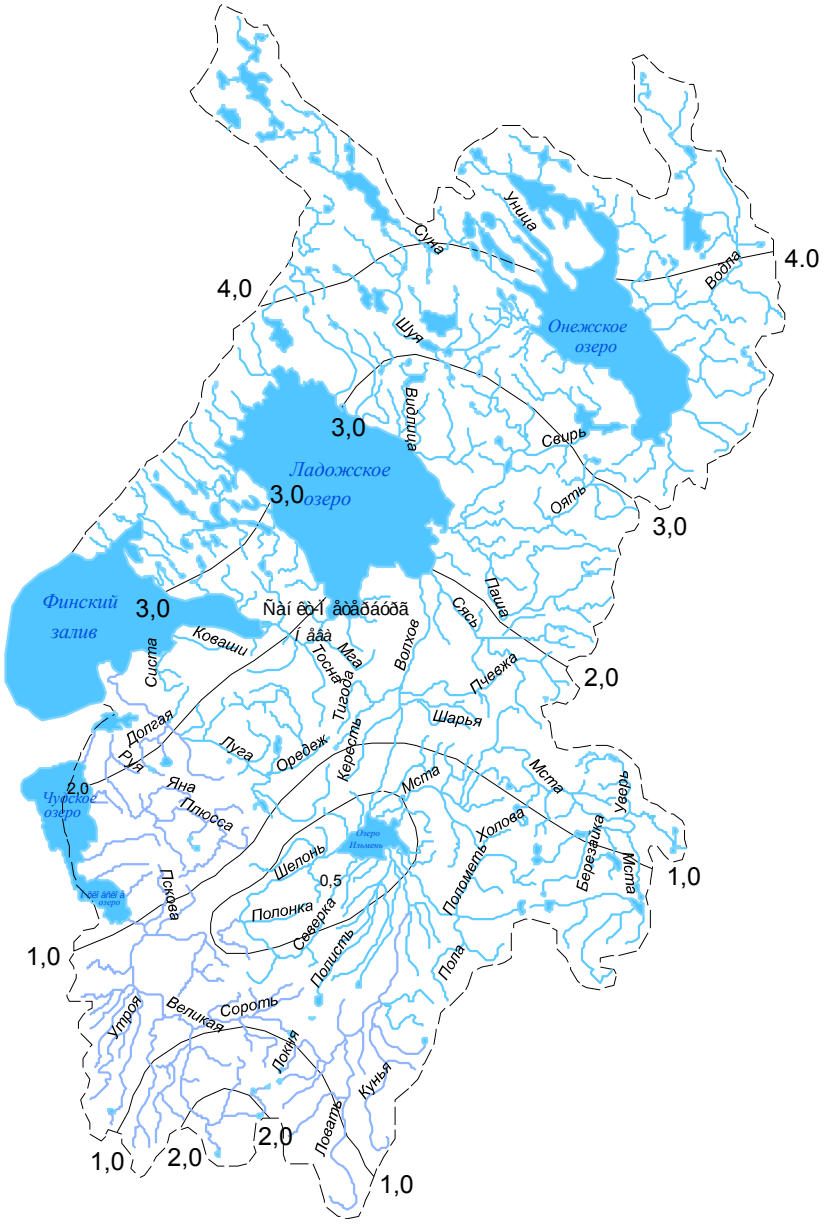


Рисунок 23 – Карта изолиний 80 %-го модуля стока

Для перехода от опорной обеспеченности 80% и от 30-суточных значений минимального расхода воды к 1-суточным необходимо рассчитывать переходные коэффициенты λ и *k*.

5.2 Районирование исследуемой территории по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени

На формирование минимального стока малых рек оказывает влияние дренирующая способность реки, характеристики подстилающей поверхности водосбора и его морфометрические характеристики, а также режим осадков и температуры воздуха.

На рисунке 24 представлена зависимость минимального 80%-го расхода воды от площади водосбора.

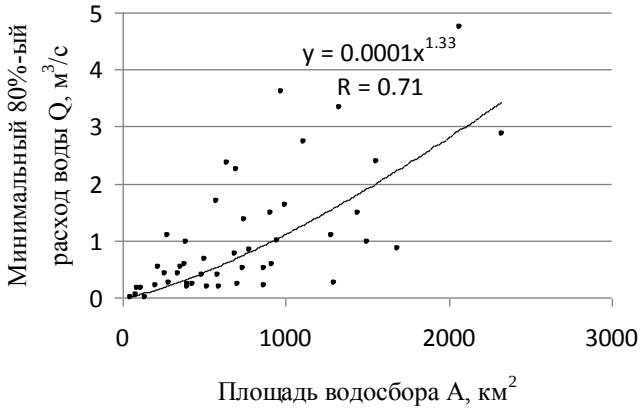


Рисунок 24 – Зависимость минимального 80%-ого расхода воды от площади водосбора

Коэффициент корреляции позволяет считать связь достаточно тесной, а уравнение регрессии может быть использовано в качестве расчетного.

При этом на территории СЗ РФ можно выделить районы, для которых условия формирования стока могут различаться.

Так, если для всего СЗ коэффициент парной корреляции *R* составил 0,71, то для выделенных пяти раонов соответственно 0,89; 0,94; 0,86; 0,86;

0,95. Зависимости предсталенны на рисунках 25 – 29; карта районирования по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени на рисунке 30.

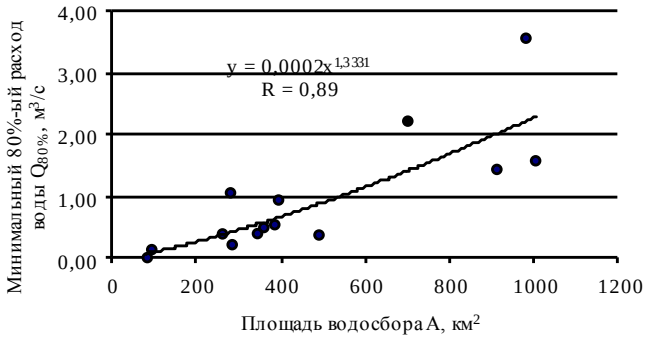


Рисунок 25 – Зависимость минимального 80%-ого расхода воды от площади водосбора для I района

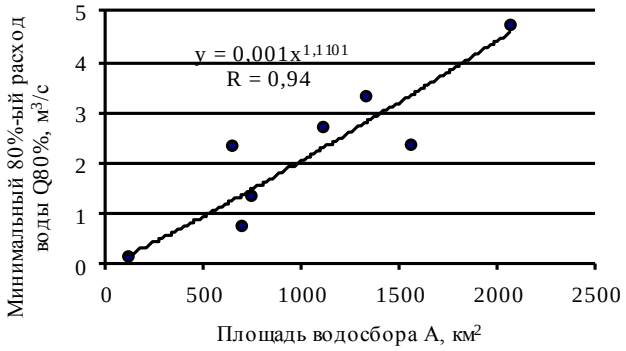


Рисунок 26 – Зависимость минимального 80%-ого расхода воды от площади водосбора для II района

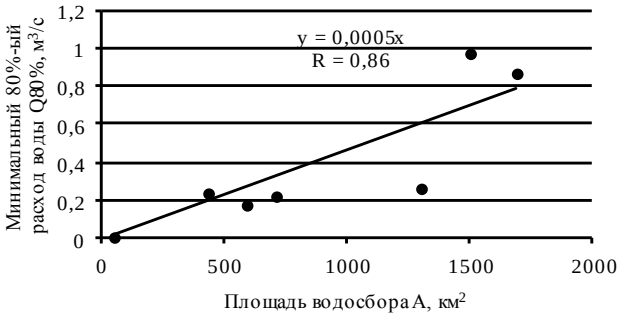


Рисунок 27 – Зависимость минимального 80%-ого расхода воды от площади водосбора для III района

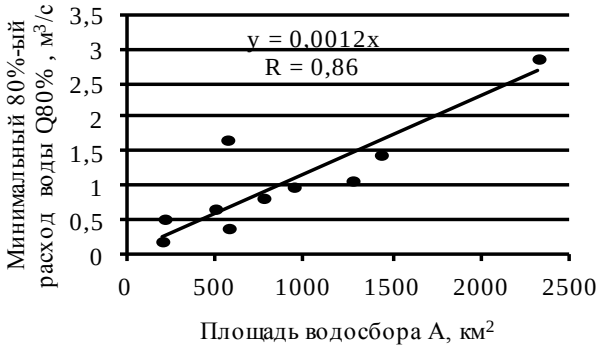


Рисунок 28 – Зависимость минимального 80%-ого расхода воды от площади водосбора для IV района

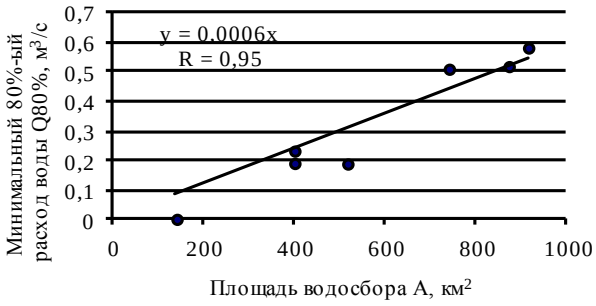


Рисунок 29 – Зависимость минимального 80%-ого расхода воды от площади водосбора для V района

Уравнение регрессии является надежным и может быть использовано в качестве расчетного для каждого из пяти выделенных рвйонов.

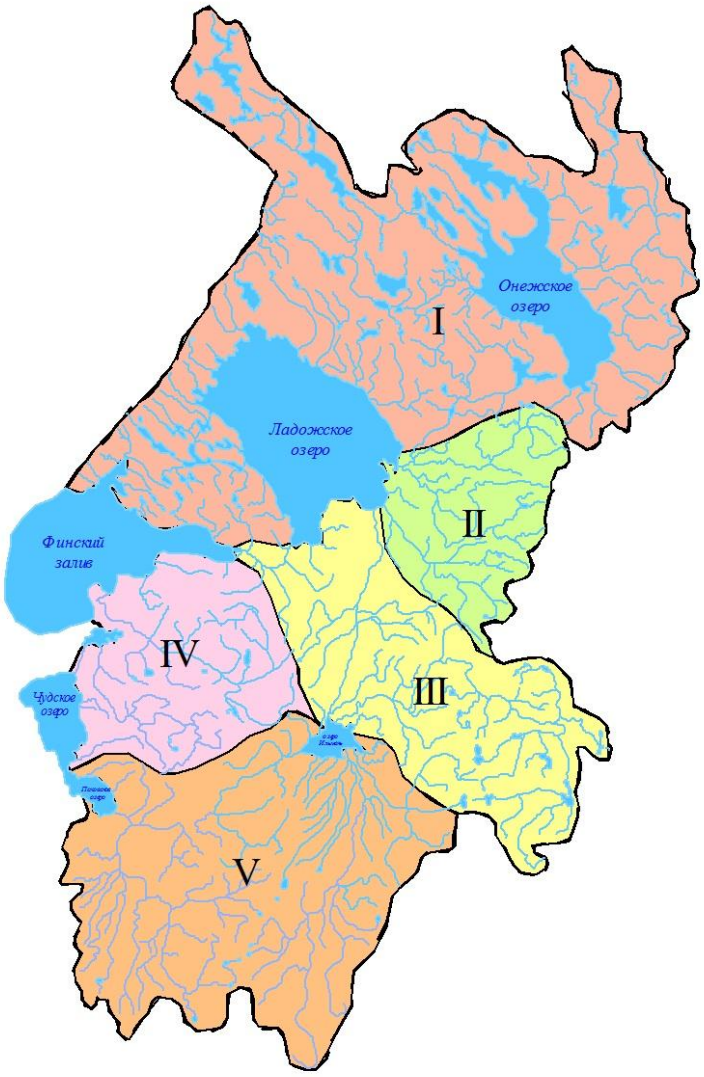


Рисунок 30 – карта районирования по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени

5.3 Уточнение параметров расчетных формул с использованием двух предикторов

Дренирующая способность реки непосредственным образом связана с глубиной эрозионного среза русла. Показатель глубины эрозионного среза может быть использован в качестве основного, помимо площади водосбора, или дополнительного предиктора расчетной формулы.

5.3.1 Расчет показателя глубины эрозионного вреза

Показатель глубины эрозионного вреза рассчитывался по формуле:

$$\Delta H = Hср.взбр. - "0" поста - Hнаим.$$

где $H_{ср.взбр.}$ - средняя высота водосбора, м

$H_{наим.}$ - наименьший уровень воды, м

Результаты представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Расчёт показателя глубины эрозионного вреза

№ МДС	Код	Река	Пункт	H наим, м	"0" поста, м БС	H ср. взбр., м	ΔH, м	A, км^2
1	72002	Селезневка	Лужайка	0,11	7,35	61	53,54	486
2	72004	Петровка	Дружноселье	1,65	9,87	47	35,48	78,6
5	72007	Перовка	Гончарово	1,64	-0,85	43	42,21	257
6	72008	Гороховка	Токарево	0,61	7,8	42	33,59	700
8	72016	Сестра	Белоостров	0,17	7,87	84	75,96	390
17	72039	Мга	Горы	0,72	5,88	48	41,4	709
18	72043	Тосна	Тосно	0,97	24,69	54	28,34	1300
28	72064	Авлога	Матокса	1,2	35,81	75	37,99	89,1
48	72104	Видлица	Большие Горы	-0,11	35,95	95	59,16	977
52	72113	Мегрега	Куйтежа	0,61	23,72	98	73,67	381
53	72114	Мегрега	Судалица	0,71	5	60	54,29	1000
60	72142	Яндеба	Яндеба	1,54	40,81	125	82,65	280
61	72144	Оять	Мининская	0,4	125,74	217	90,86	693
66	72154	Паша	Поречье	1,11	71,34	169	96,55	1110
70	72158	Явосьма	Ушаково	0,68	75,96	170	93,36	742
73	72162	Капша	Еремина Гора	0,6	49,57	160	109,83	1560
75	48006	Лососинка	Петрозаводск	1,04	133,49	215	80,47	276
78	48021	Шуя	Бесовец	0,03	33,46	146	112,51	9560
84	48030	Святрека	Пряжа	0,25	90,34	181	90,41	355
89	48038	Суна	Поросозеро	0,62	162,75	201	37,63	3370
93	48055	Уница	Уница	1,66	35,37	123	85,97	340
100	48071	Пяльма	Пяльма	0,11	34,4	137	102,49	908
102	48079	Водла	Харловская	0,14	32,95	149	115,91	12000
121	72169	Сясь	Яхново	0,08	8,97	96	86,95	6230
122	72172	Воложба	Пареево	0,51	67,39	180	112,1	644
123	72173	Воложба	Воложба	1,1	44,69	149	103,21	1330
129	72188	Тихвинка	Горелуха	0,66	28,11	108	79,23	2070
131	72192	Дымка	Домачево	0,81	58,02	112	53,17	112

Продолжение табл. 5.1

№ МДС	Код	Река	Пункт	Н наим, м	"0" поста, м БС	Н ср. взбр., м	ΔН, м	А, км^2
141	72227	Кересть	Сябреницы	0,02	20,22	45	24,76	833
145	72239	Пчевжа	Белая	0,58	18,92	67	47,5	1690
149	72246	Тигода	Любань	0,63	28,9	50	20,47	589
152	72259	Мста	Берез. Рядок	-0,23	135,27	206	70,96	5180
153	72269	Мста	Потерпелицы	-1,62	66,13	185	120,49	13200
154	72276	Мста	Бор	1,55	44,99	174	127,46	16900
155	72281	Мста	Девкино	-0,62	21,27	154	133,35	22500
161	72305	Березайка	Устье	0,39	143,97	187	42,64	3030
170	72327	Уверь	Меглецы	1,59	132,88	171	36,53	1750
196	72409	Холова	Горбуново	1,96	25,77	93	65,27	1500
202	72432	Полометь	Дворец	-0,18	154,59	207	52,59	432
205	72441	Лонница	Мосолино	0,18	156,83	220	62,99	48,3
206	72450	Ловать	Узкое	1,34	143,66	169	24	398
207	72454	Ловать	Великие Луки	0,79	91	162	70,21	3270
209	72459	Ловать	Холм	-0,13	42,25	140	97,88	14700
213	72467	Локня	Бородино	0,73	93,51	162	67,76	398
214	72477	Кунья	Уварово	0,84	72,33	149	75,83	2480
215	72478	Кунья	Холм	1,8	42,19	142	98,01	5140
217	72481	Б.Тудер	Бабяхтино	0,27	56,75	135	77,98	871
223	72504	Перехода	Подсосонье	0,53	63,22	85	21,25	138
225	72508	Шелонь	Порхов	0,82	43,5	94	49,68	2950
226	72510	Шелонь	Заполье	0,98	24,66	86	60,36	6820
230	72518	Уза	Дубская	0,54	50,32	132	81,14	515
237	72552	Коваши	Лендовщина	1,67	3,06	78	73,27	505
238	72559	Систа	Средн. Райково	0,37	4,44	92	87,19	573
239	72564	Луга	Воронино	1,28	40,07	58	16,65	864
240	72566	Луга	Луга	0,3	35,08	62	26,62	2330
242	72577	Луга	Кингисепп	0,28	-0,06	73	72,78	12800
245	72588	Оредеж	Вырица	1,1	50,85	110	58,05	920
246	72589	Оредеж	Моровино	1,08	31,75	80	47,17	3060
248	72592	Орлинка	Орлинка	0,53	65,12	95	29,35	206
252	72603	Ящера	Долговка	0,37	42,72	79	35,91	581
253	72605	Лемовжа	Хотнежа	0,67	31,31	106	74,02	948
254	72609	Саба	Райково	-0,02	28,9	64	35,12	1280
256	72614	Долгая	Загорье	0,04	34,05	64	29,91	777
258	72623	Плюсса	Плюсса	1,63	46,09	86	38,28	1440
259	72625	Плюсса	Брод	0,77	31,52	82	49,71	5090
264	72643	Руя	Малые Рожки	1,51	39,35	72	31,14	219
271	72654	Великая	Опочка	0,51	81	167	85,49	3500
273	72660	Великая	Гуйтово	1,82	43,43	127	81,75	13400
274	72661	Великая	Пятоново	0,71	39,64	119	78,65	20000
284	72682	Сороть	Осинкино	0,24	64,48	123	58,28	3170

Продолжение табл. 5.1

№ МДС	Код	Река	Пункт	Н наим, м	"0" поста, м БС	Н ср. взбр., м	ΔН, м	А, км^2
289	72696	Утроя	Большая Губа	1,03	48,77	110	60,2	2970
297	72716	Кудеб	Свериково	0,5	49,5	131	81	739
301	72727	Пскова	Черняковицы	0,98	41,81	107	64,21	914

5.3.2 Оценка точности расчетных формул

Проведенный регрессионный анализ позволил оценить значимость показателя глубины эрозионного вреза и, таким, образом целесообразность его применения для расчета минимального стока малых рек при отсутствии наблюдений. Вывод итогов регрессионного анализа для III района представлен на рисунке 31.

Регрессионная статистика					
Множественный R	0,95				
R-квадрат	0,90				
Нормированный R-квадрат	0,85				
Стандартная ошибка	0,14				
Наблюдения	7				
Дисперсионный анализ					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Значимость F*
Регрессия	2	0,74	0,37	17,82	0,01
Остаток	4	0,08	0,02		
Итого	6	0,83			
	Коэффициенты	*Стандартная ошибка*	*t-статистика*	*P-Значение*	
Y-пересечение	-0,48	0,19	-2,49	0,07	
Переменная *A*	0,0005	0,00	5,56	0,01	
Переменная *ΔH*	0,009	0,00	2,45	0,07	

Рисунок 31 – Регрессионный анализ III района

Коэффициент множественной корреляции составляет 0,95, в то время, когда коэффициент парной корреляции, в том случае, если исследуется зависимость минимального расхода воды только от площади водосбора, представляет собой меньшую величину и составляет 0,86.

Для пяти выделенных районов были получены параметры расчётных формул и посчитаны погрешности минимального стока. Для районов I, II, IV

и V регрессионный анализ выявил не значимость показателя глубины эрозионного вреза. Таким образом, вводить этот показатель в расчетную формулу целесообразно только для III района.

В таблице 5.2. представлены расчетные формулы для пяти гидрологически однородных районов по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени, а также абсолютные и относительные погрешности.

Таблица 5.2 – Параметры расчётных формул и погрешности минимального стока

Район	Тип формулы					Относ. погрешность, %		Абс.погрешность, л/с·км^2	
	1. $Q_{80\,\%} = aA^n$		2. $Q_{80\,\%} = aA+b\Delta H+c$			$б_1$	$б_2$	ε_1	ε_2
	Параметры								
	a	*n*	*a*	*b*	*c*				
I	0,0002	1,33				39		0,77	
II	0,001	1,11				28		0,54	
III	0,005	1,00	0,0005	0,009	-0,48	51	34	0,15	0,12
IV	0,001	1,00				25		0,50	
V	0,0006	1,00				19		0,16	

Использование показателя глубины эрозионного вреза в качестве второго предиктора для расчета минимального стока уменьшает относительную погрешность формулы более, чем в 1,5 раза. При этом абсолютные погрешности находятся в пределах 0,77-0,12 л/с км^2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты позволили уточнить карту изолиний 80%-го модуля стока для средних рек с использование данных последних (до 2010 г. включительно) наблюдений на реках СЗ РФ.

Анализ минимального стока рек СЗ РФ не показал значимости линейных трендов в рядах минимальных 30-суточных расходов воды. Увеличение суммарных осадков в теплый период года по данным метеостанций исследуемого района не оказывает заметного влияния на увеличение стока в период летне-осенней межени, поскольку увеличение температуры воздуха в этот же период приводит к увеличению испарения, в свою очередь приводящему к уменьшению стока.

При районировании территории по условиям формирования минимального стока летне-осенней межени было выделено 5 однородных гидрологических района, для каждого из которых построены зависимости минимального модуля стока от площади водосбора и получены параметры расчетных формул для определения расхода воды 80 %-ой обеспеченности для малых рек при отсутствии данных наблюдений. Для 3-го района в качестве второго предиктора используется показатель глубины эрозионного вреза русла.

Производилась оценка точности расчетных формул, для которых рассчитывались абсолютные и относительные погрешности.

В качестве второго предиктора для расчета минимального стока летне-осенней межени рекомендовано использование показателя глубины эрозионного вреза, уменьшающее относительную погрешность формулы более, чем в 1,5 раза. Для остальных четырех районов, как показал регрессионный анализ, второй предиктор является незначимым.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 365 с.

2 Ресурсы поверхностных вод СССР. Монография. Т.2.Карелия и Северо-Запад. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 528 с.

3 Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 444 с.

4 Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 681 с.

5 Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 279 с.

6 СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – М.: Стройиздат, 2004. – 35 с.

7 СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.

8 Горошков И.В. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 439 с.

9 Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т.2. ч.1. Карелия и Северо-Запад. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 699 с.

10 Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т.2. ч.2. Карелия и Северо-Запад. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 682 с.

11 Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т.2. ч.3. Карелия и Северо-Запад. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 661 с.

12 Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – СПб.: Нестор – История, 2009. – 193 с.

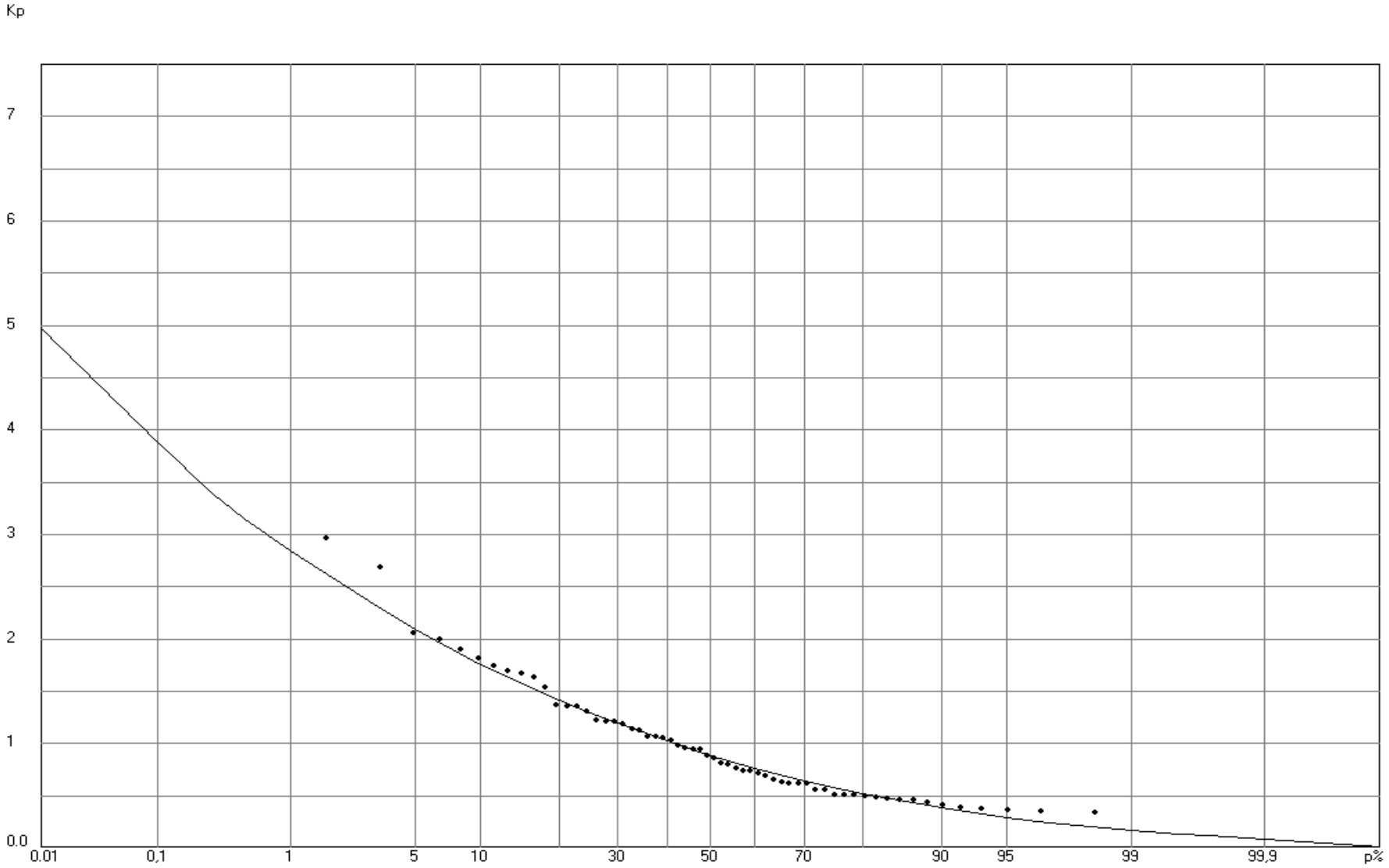
13 Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. – СПб.: Санкт – Петербург, 2004. – 67 с.

14 Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб.: Нестор – История, 2009. – 162 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

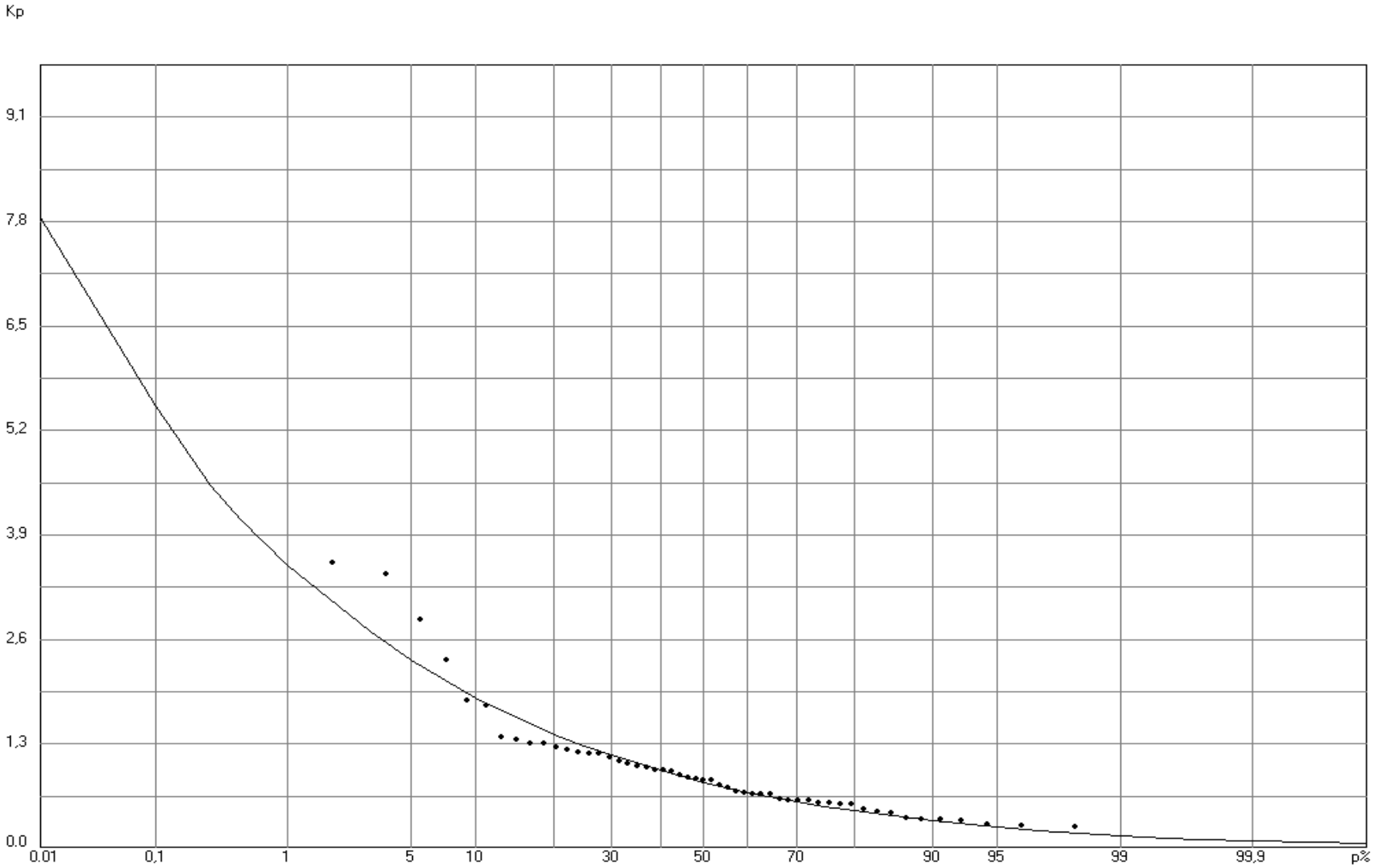
Приложение А 1

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Шуя – Бесовец



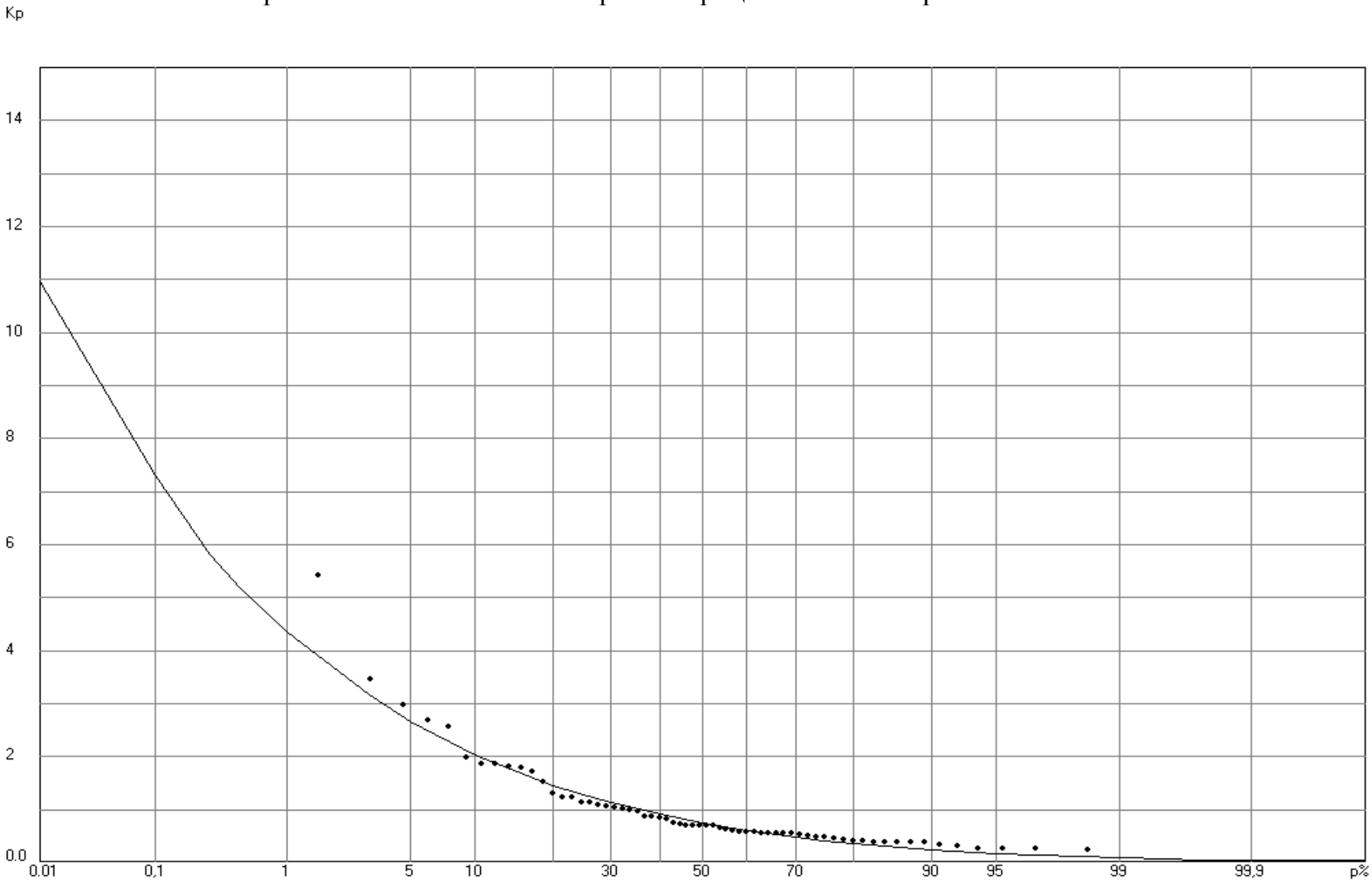
Приложение А 2

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Шелонь – Порхов



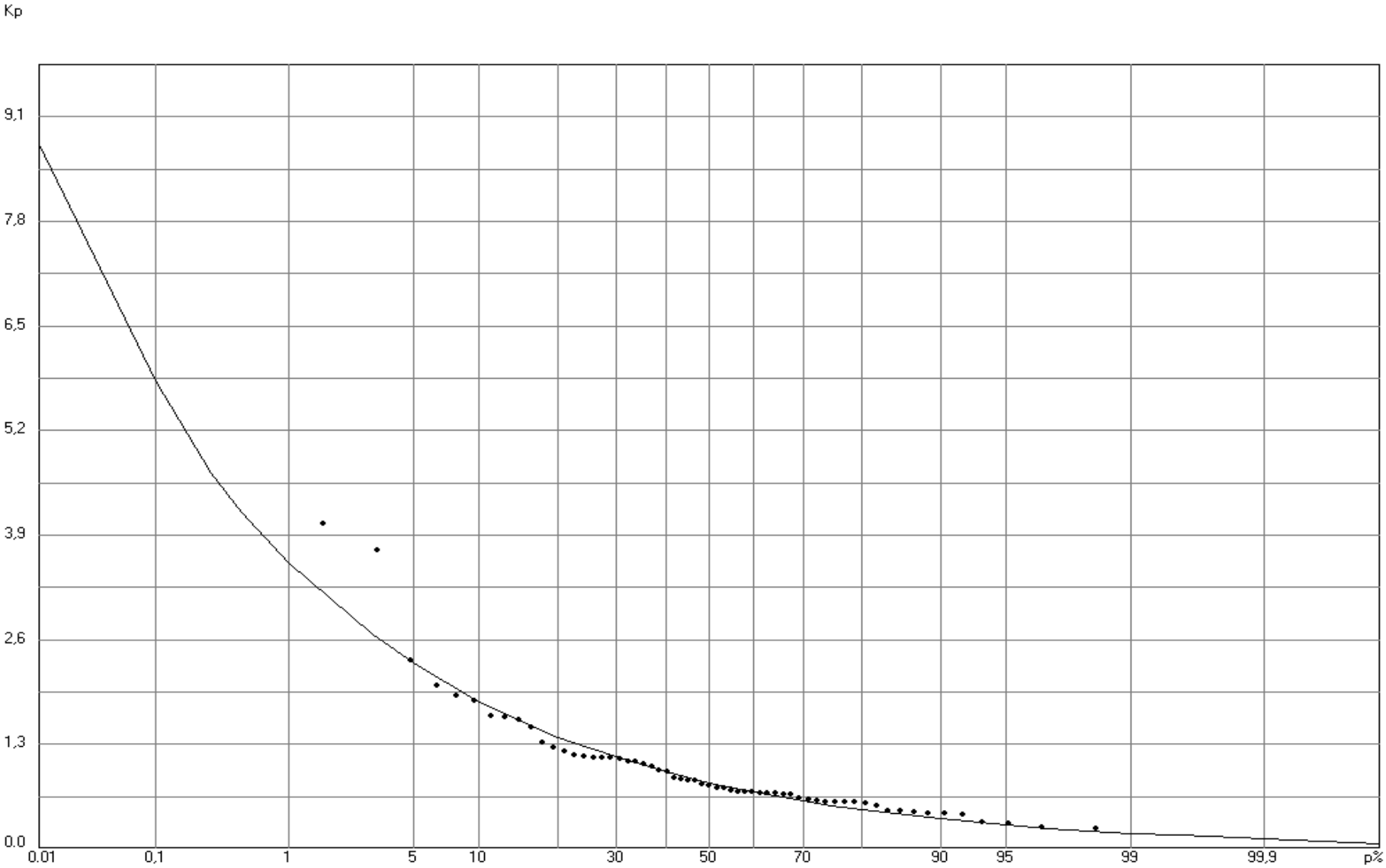
Приложение А 3

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Шелонь – Заполье



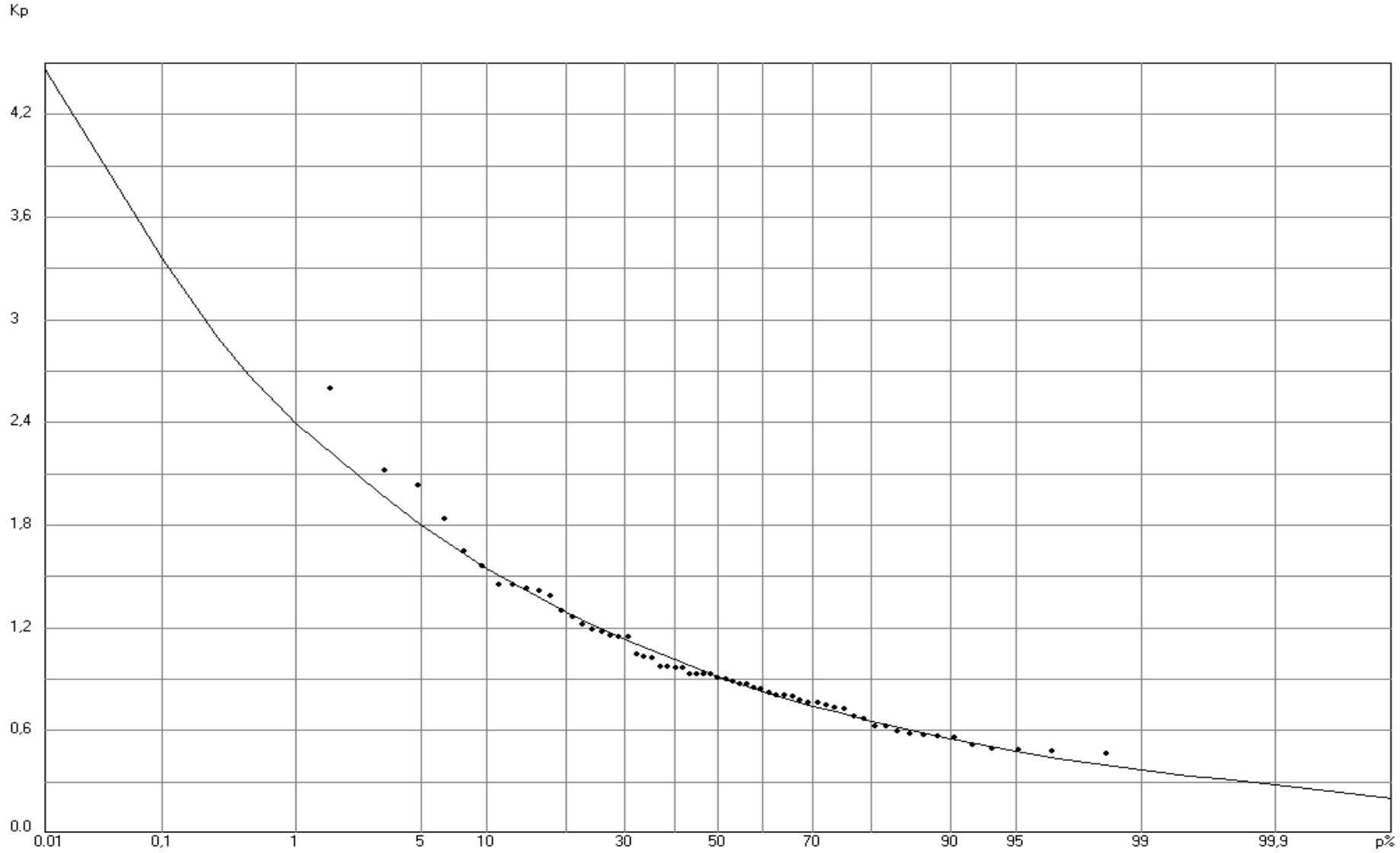
Приложение А 4

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Утроя – Большая Губа



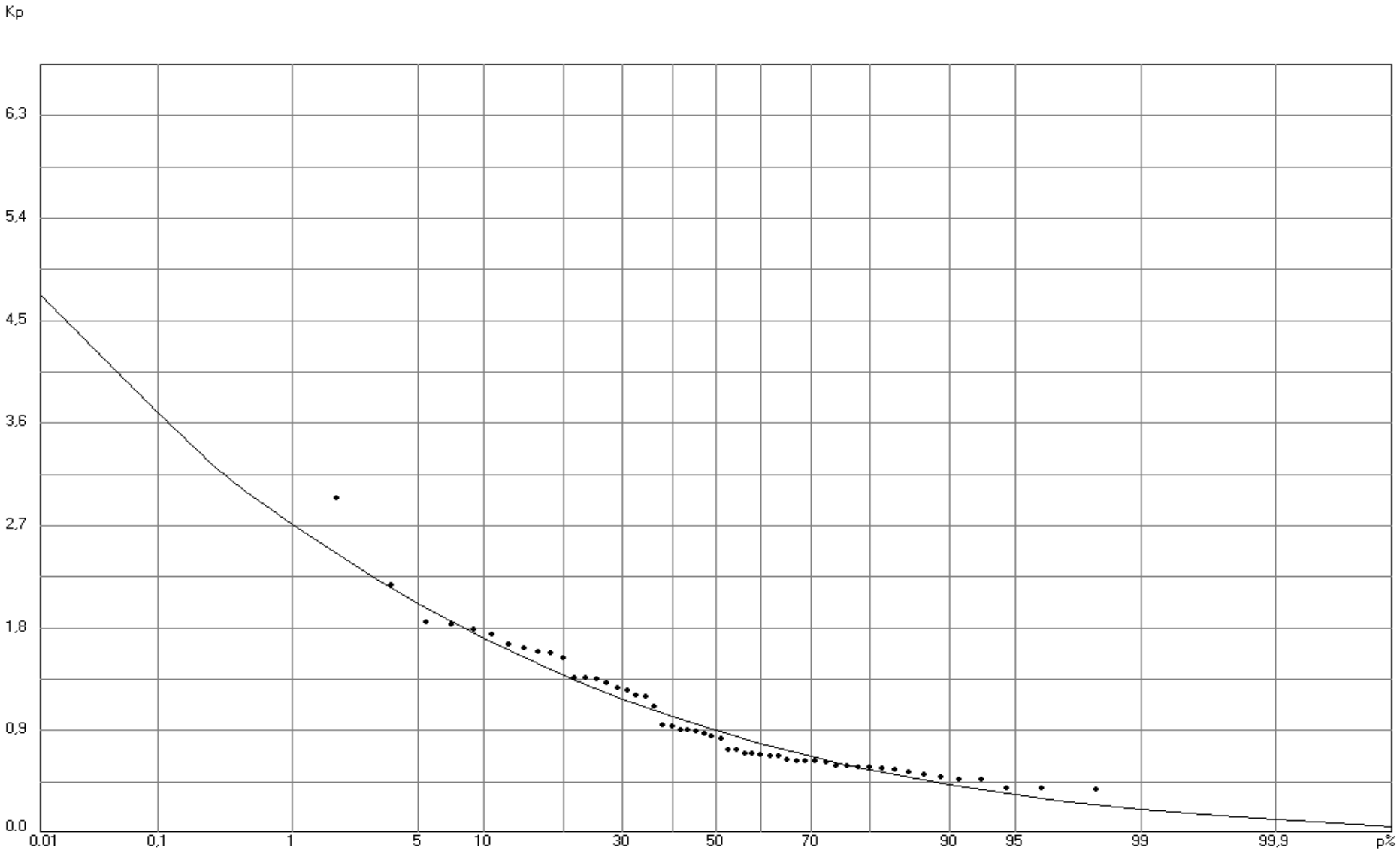
Приложение А 5

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Сясь – Яхново



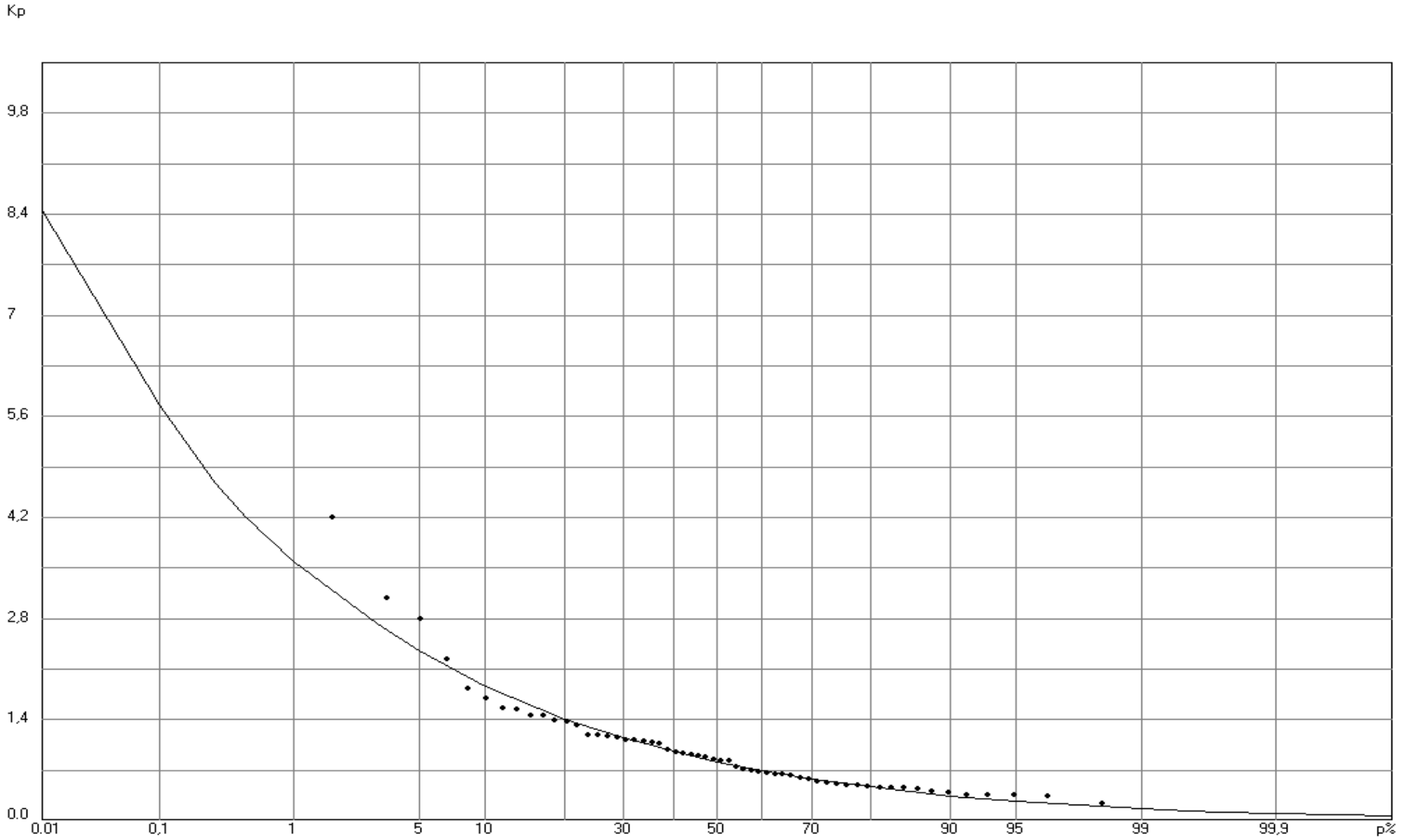
Приложение А 6

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Суна – Поросозеро



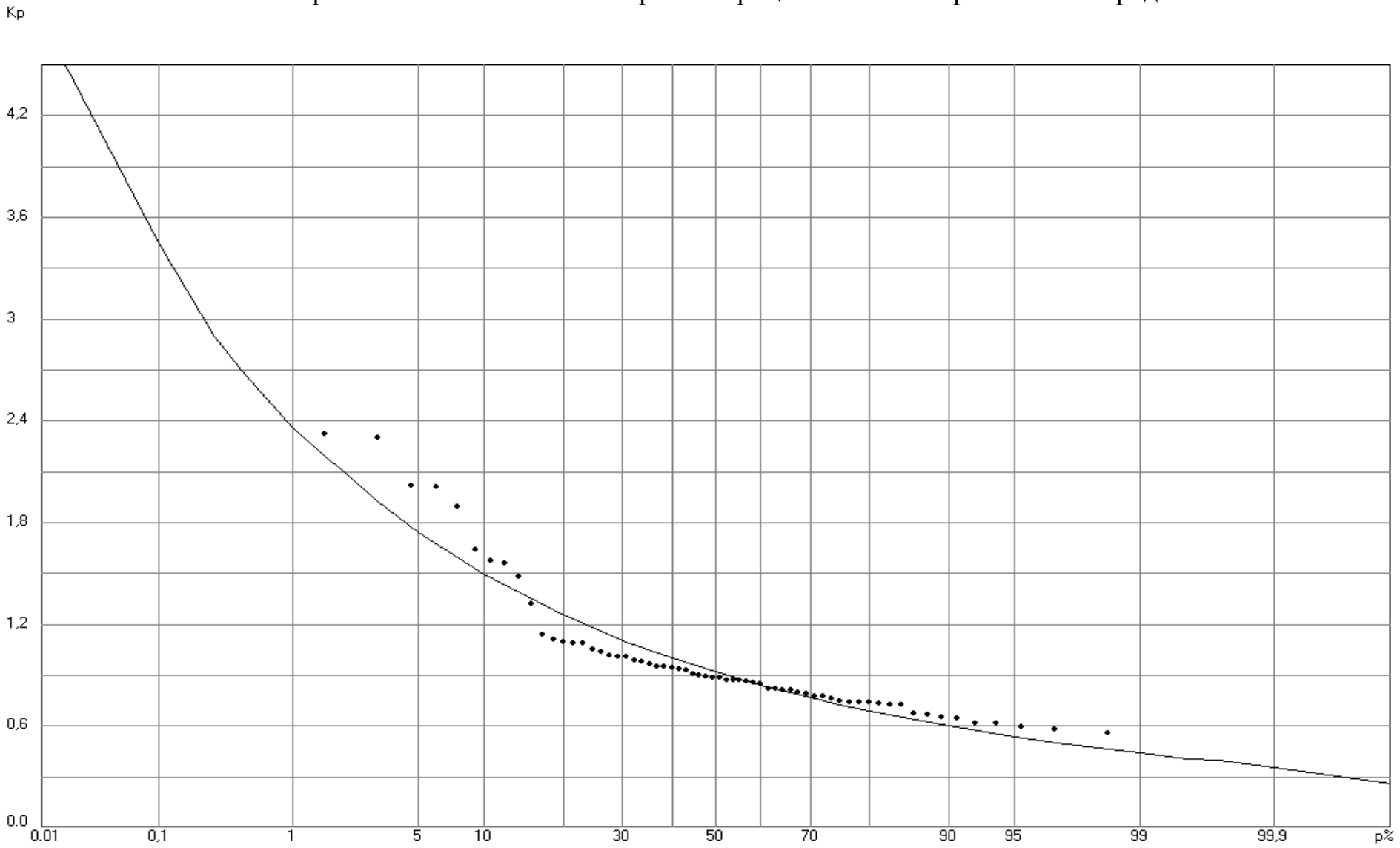
Приложение А 7

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Сороть – Осинкино



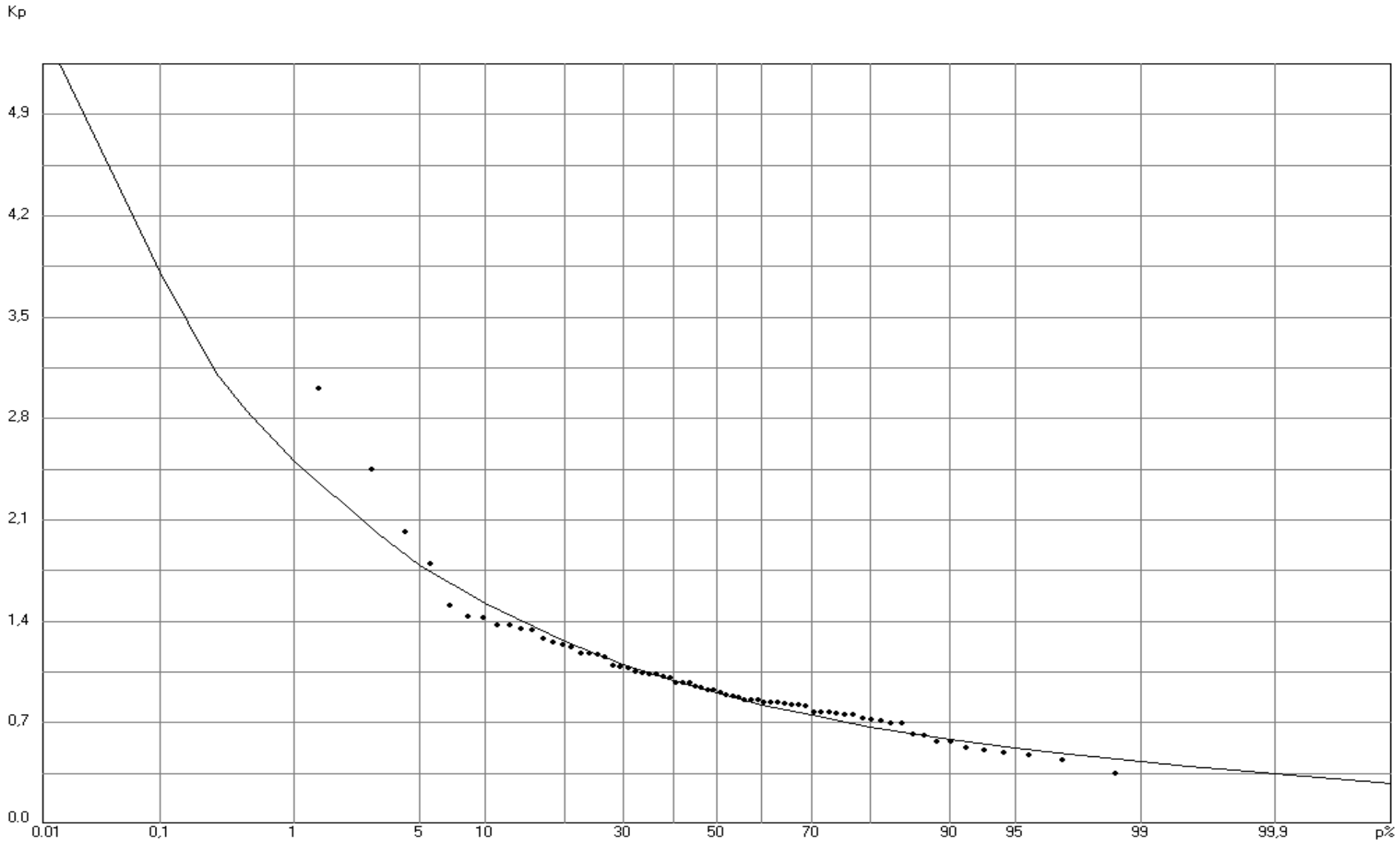
Приложение А 8

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Плюсса – Брод



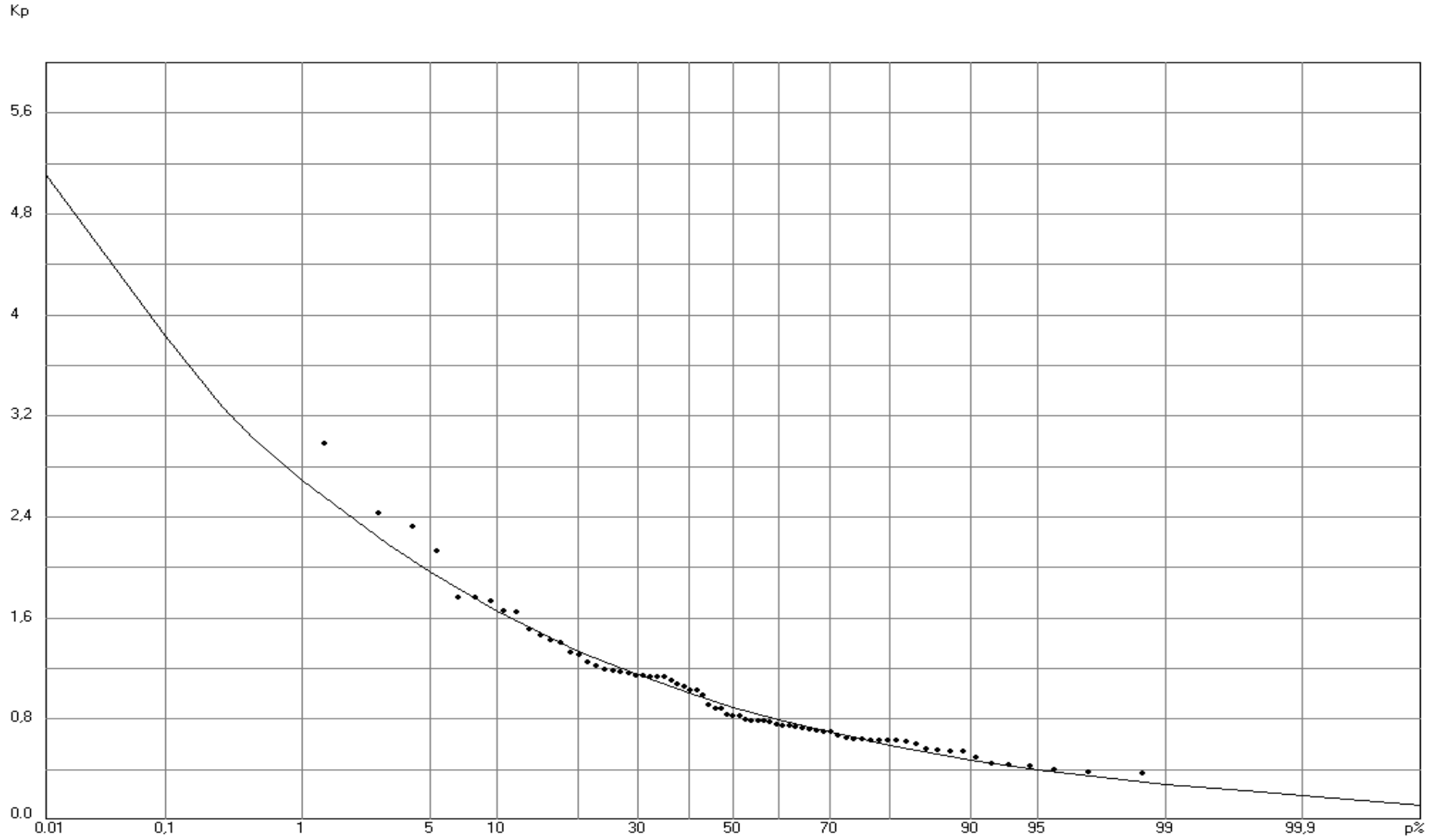
Приложение А 9

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Оредеж – Моровино



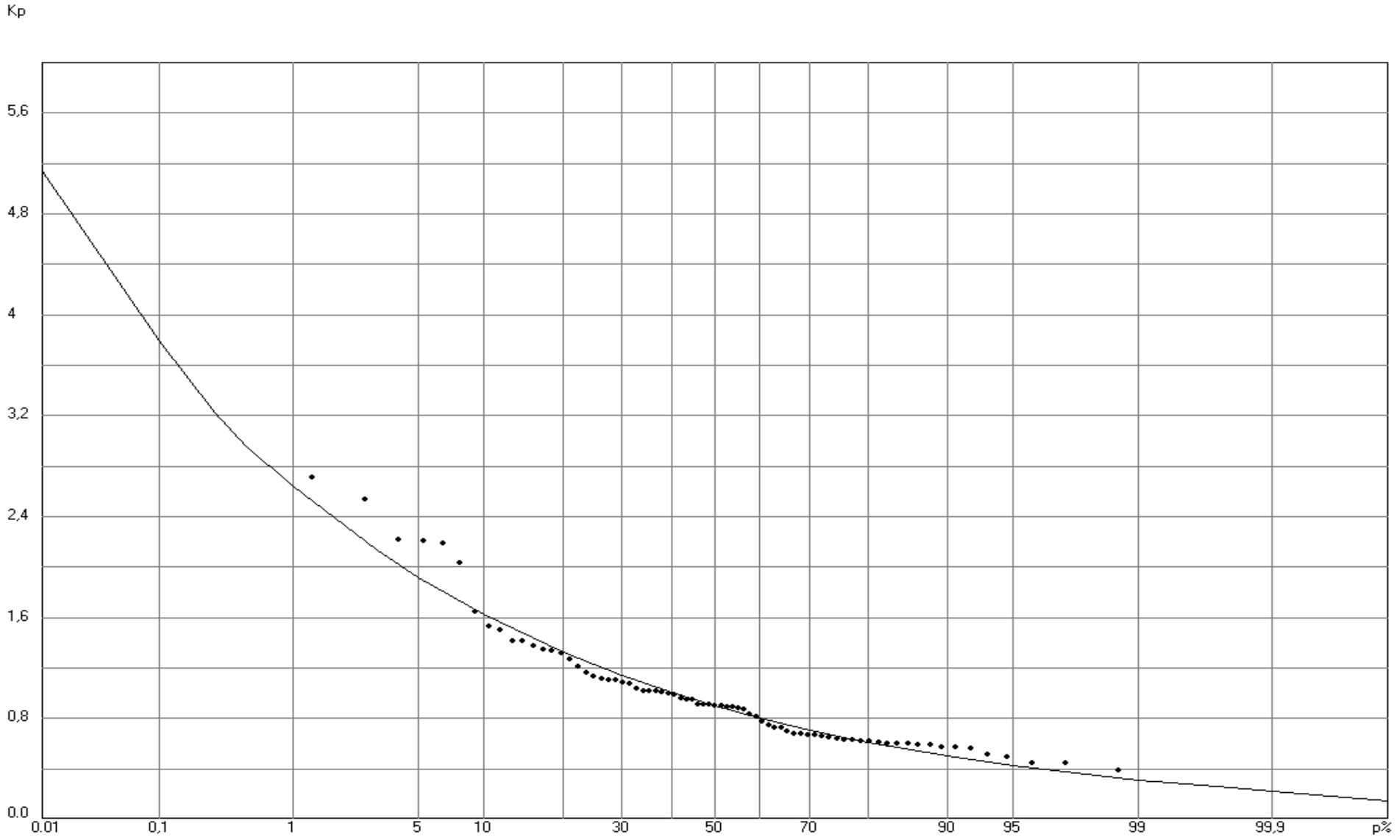
Приложение А 10

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Мста – Потерпелицы



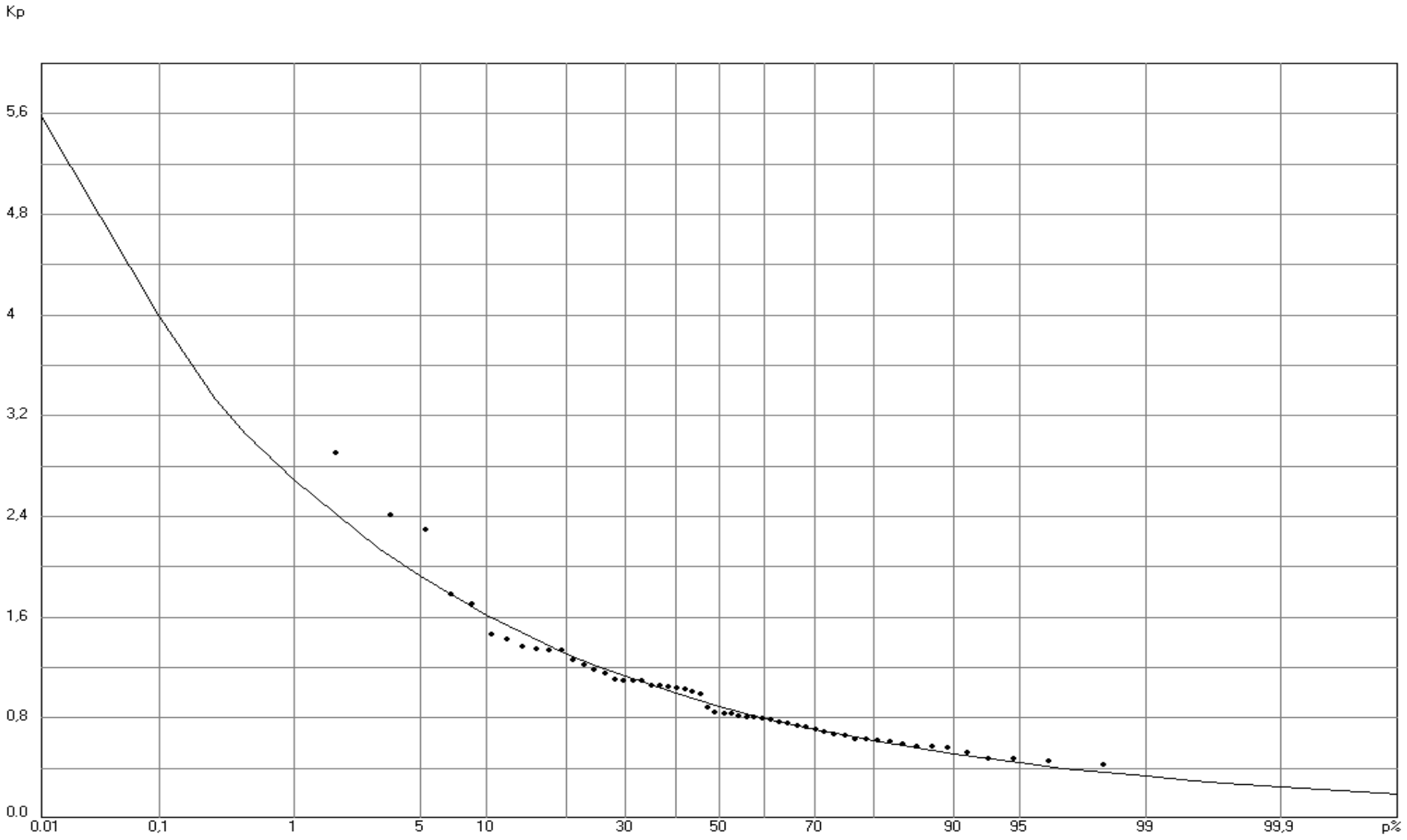
Приложение А 11

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Мста – Девкино



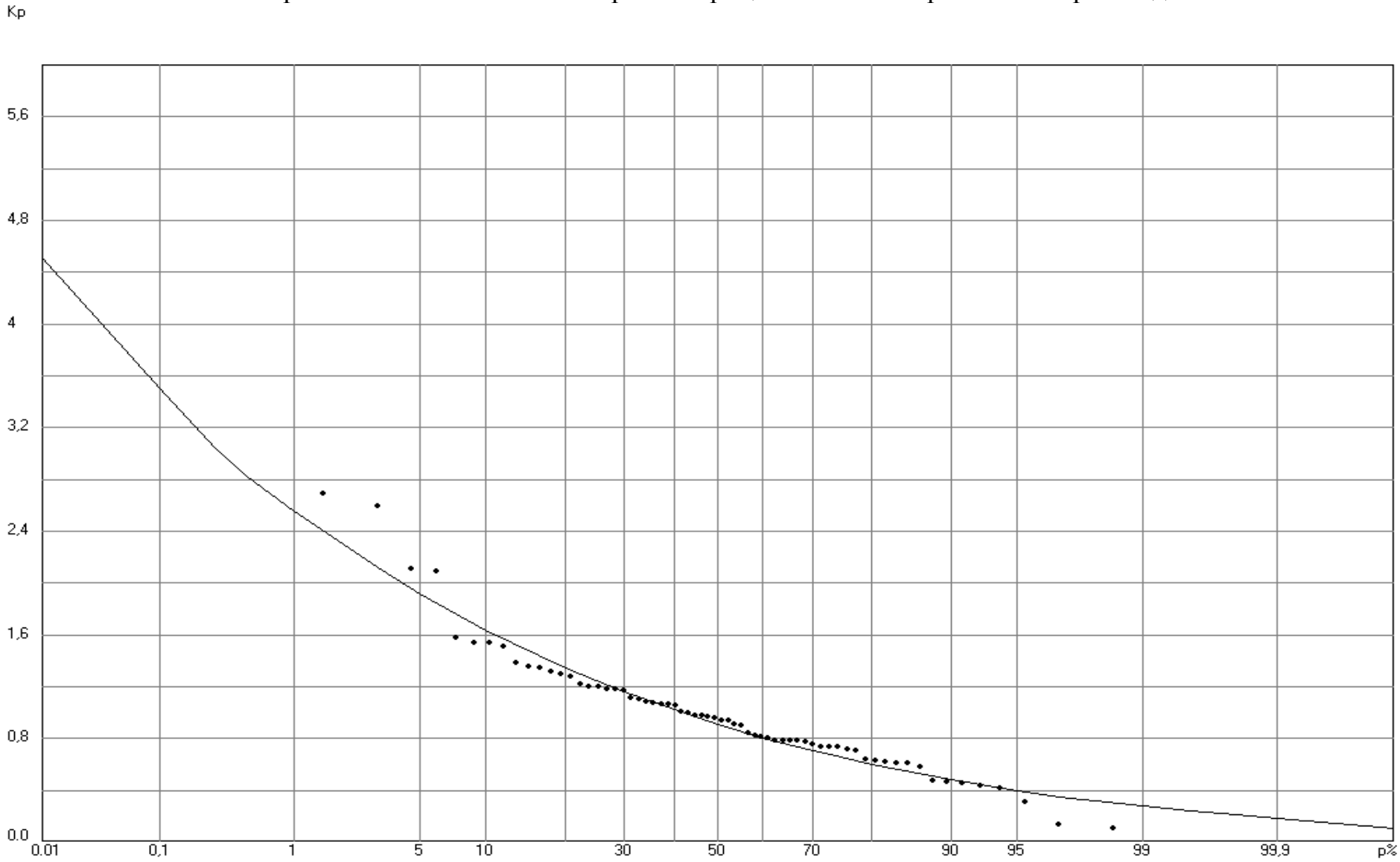
Приложение А 12

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Мста – Бор



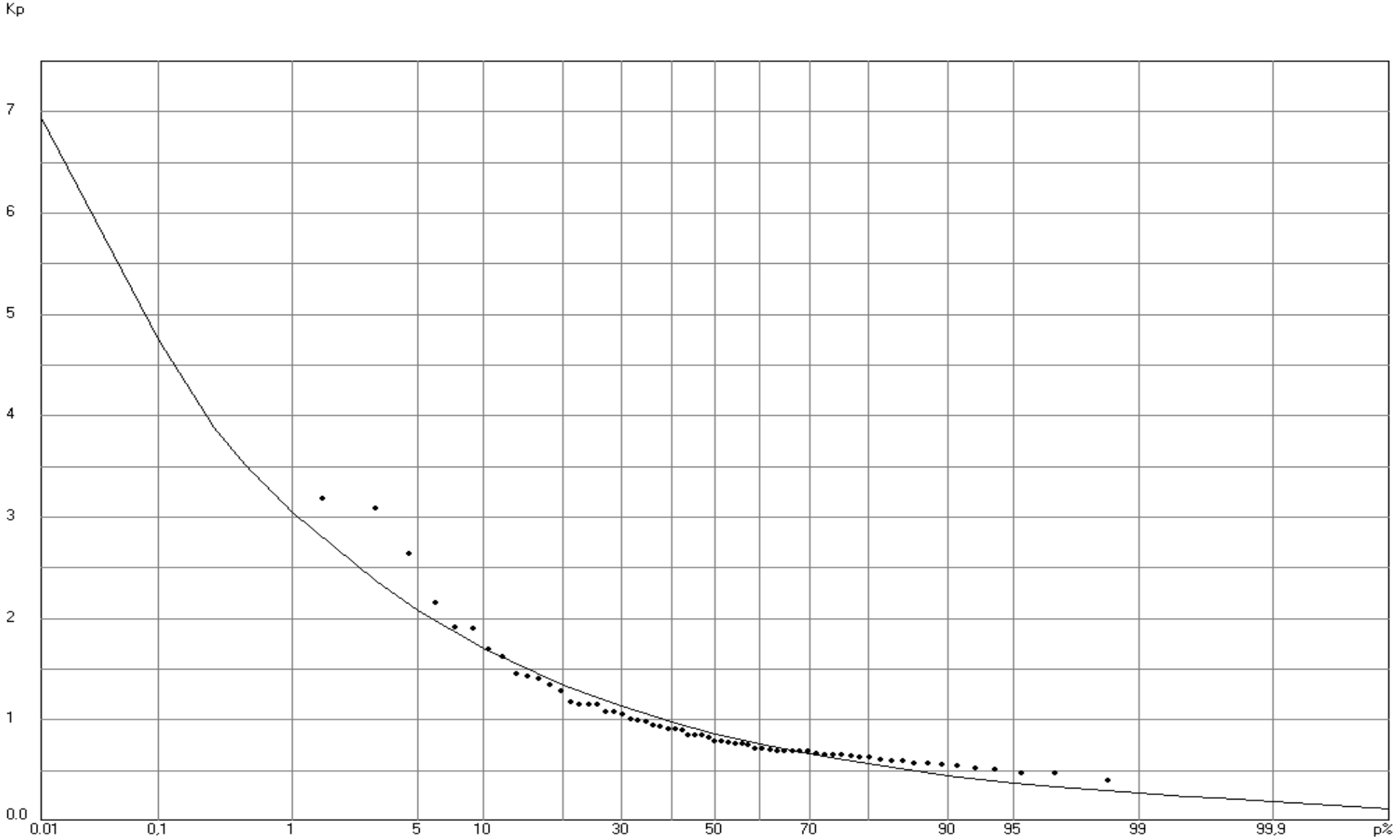
Приложение А 13

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Мста – Берез. Рядок



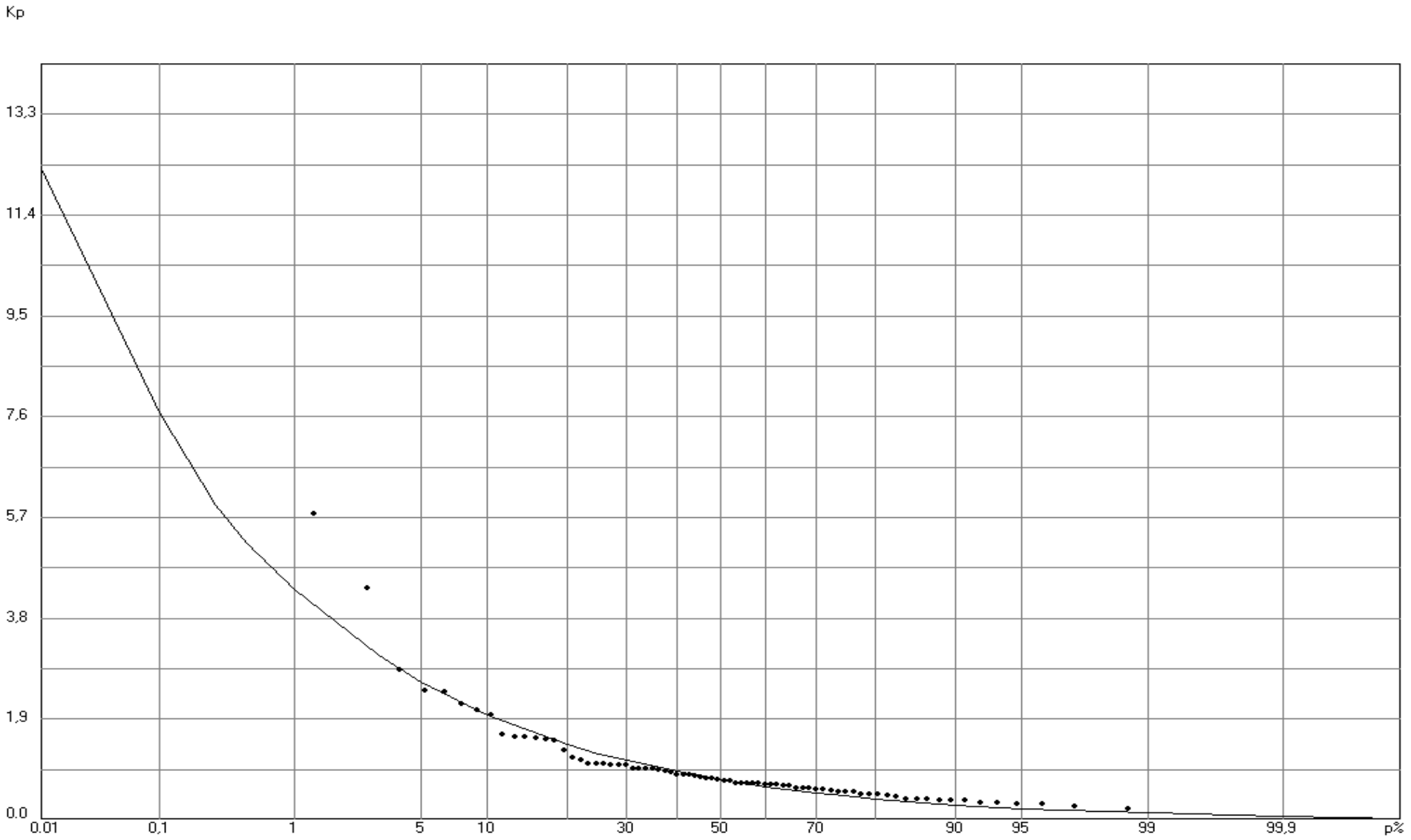
Приложение А 14

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Луга – Кингисепп



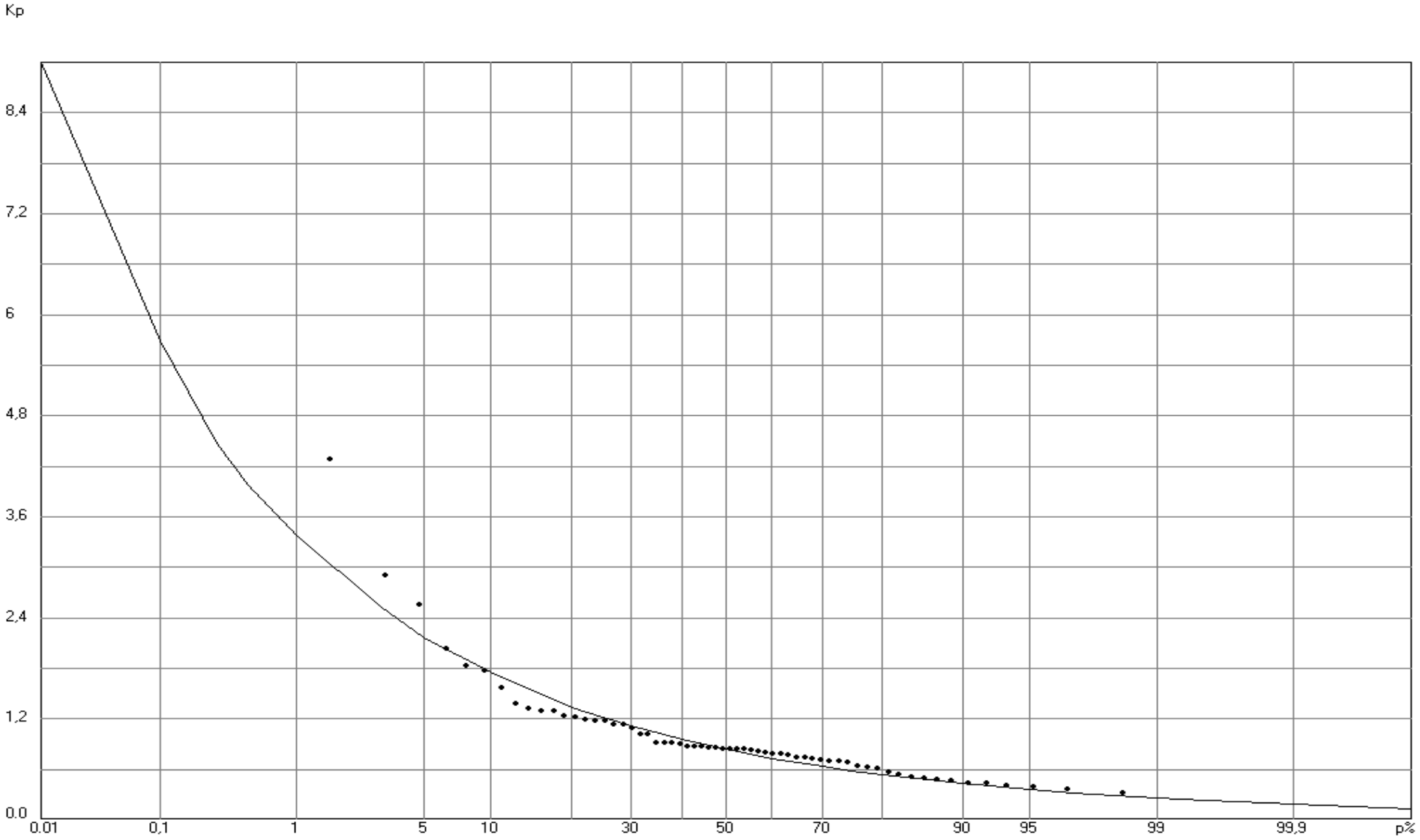
Приложение А 15

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Ловать – Холм



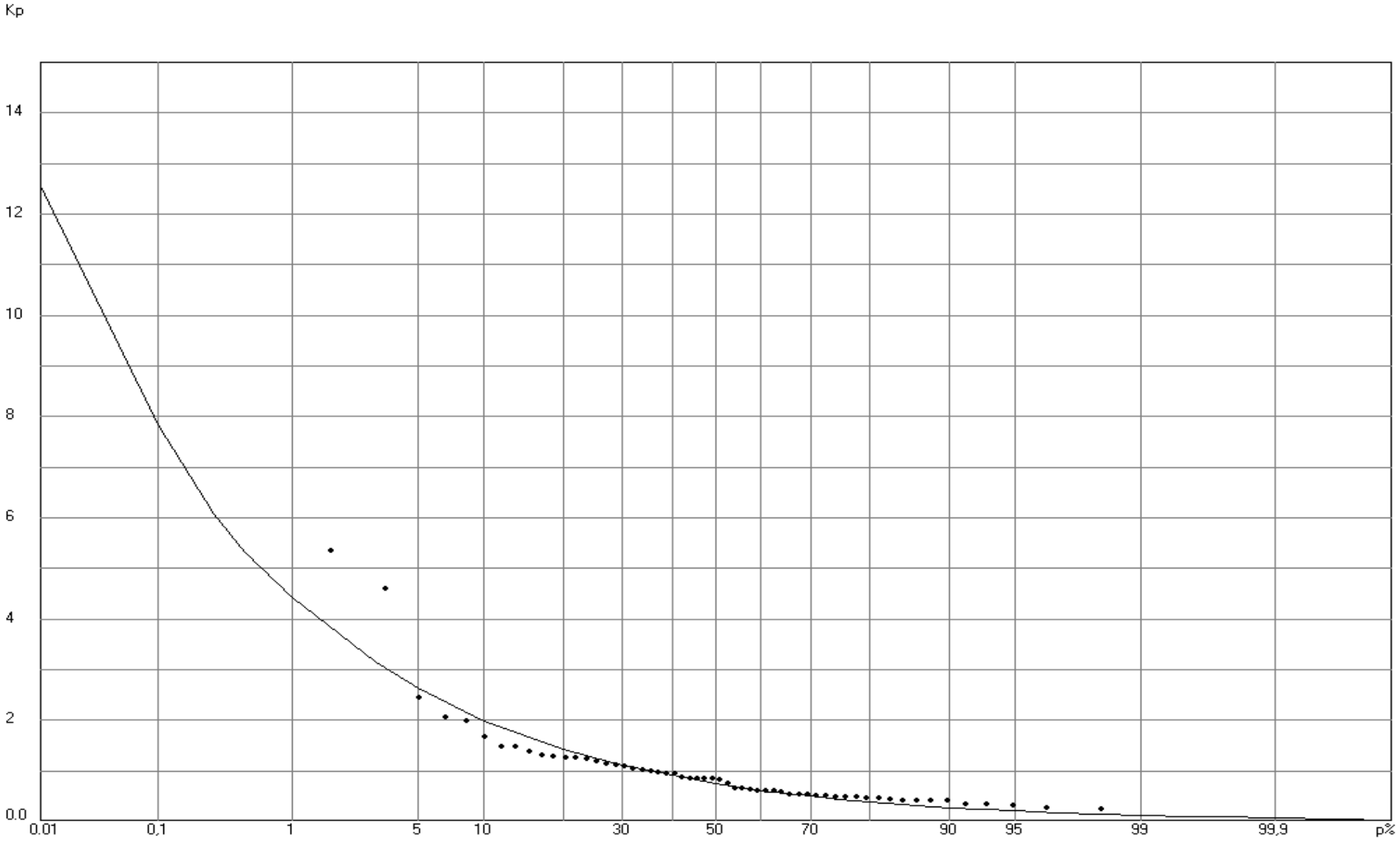
Приложение А 16

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Ловать – Великие Луки

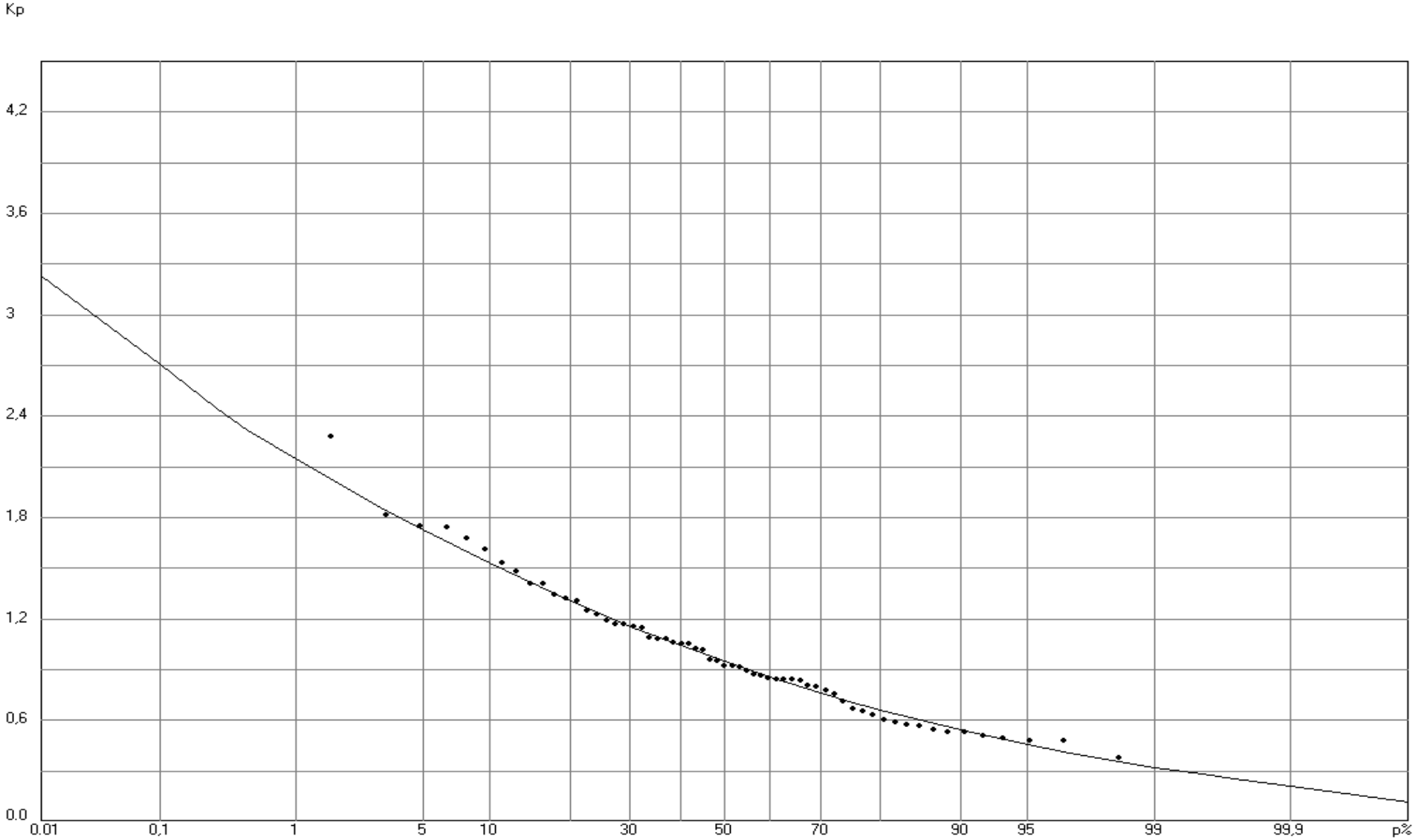


Приложение А 17

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Кунья – Холм

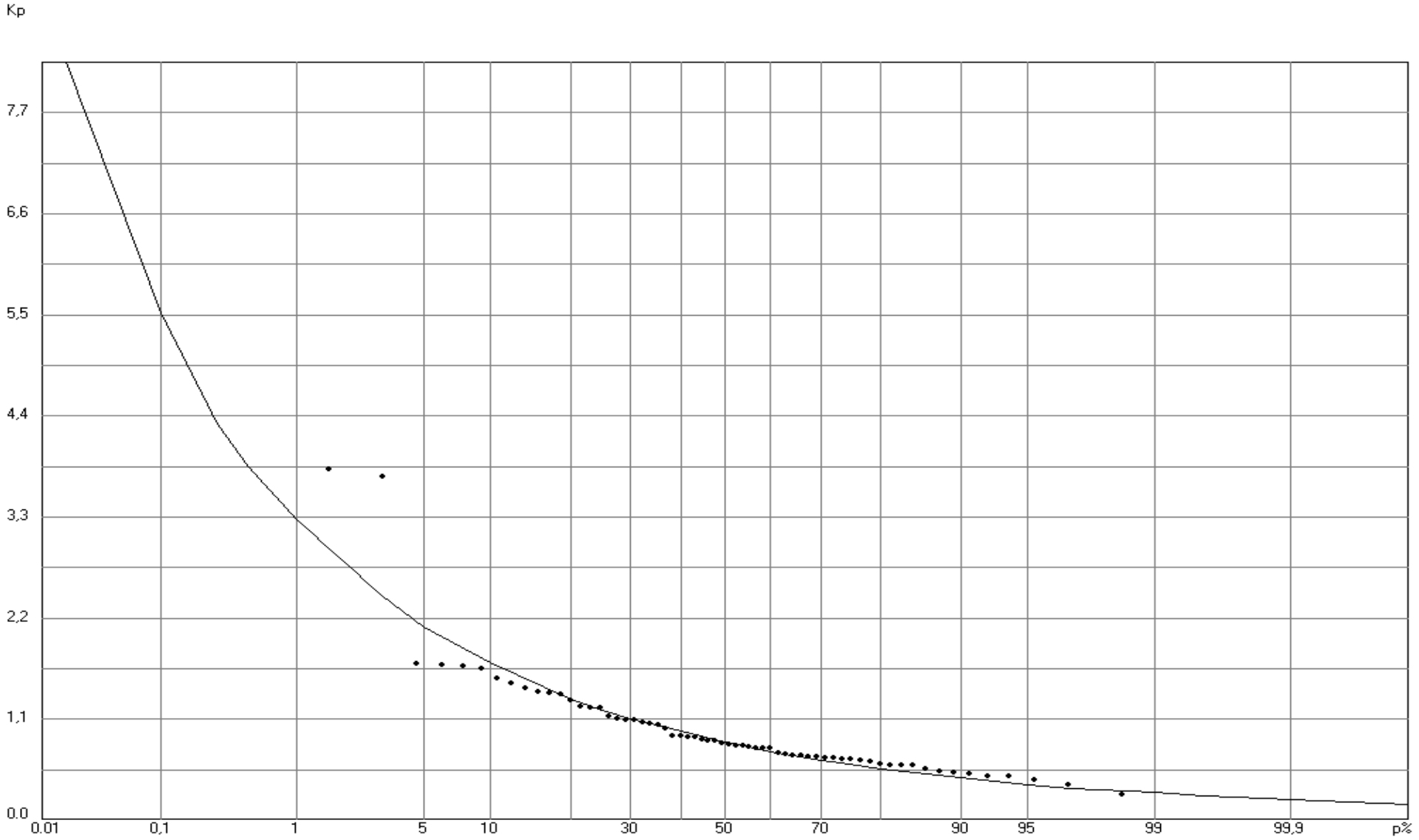


Приложение А 18
Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Водла – Харловская



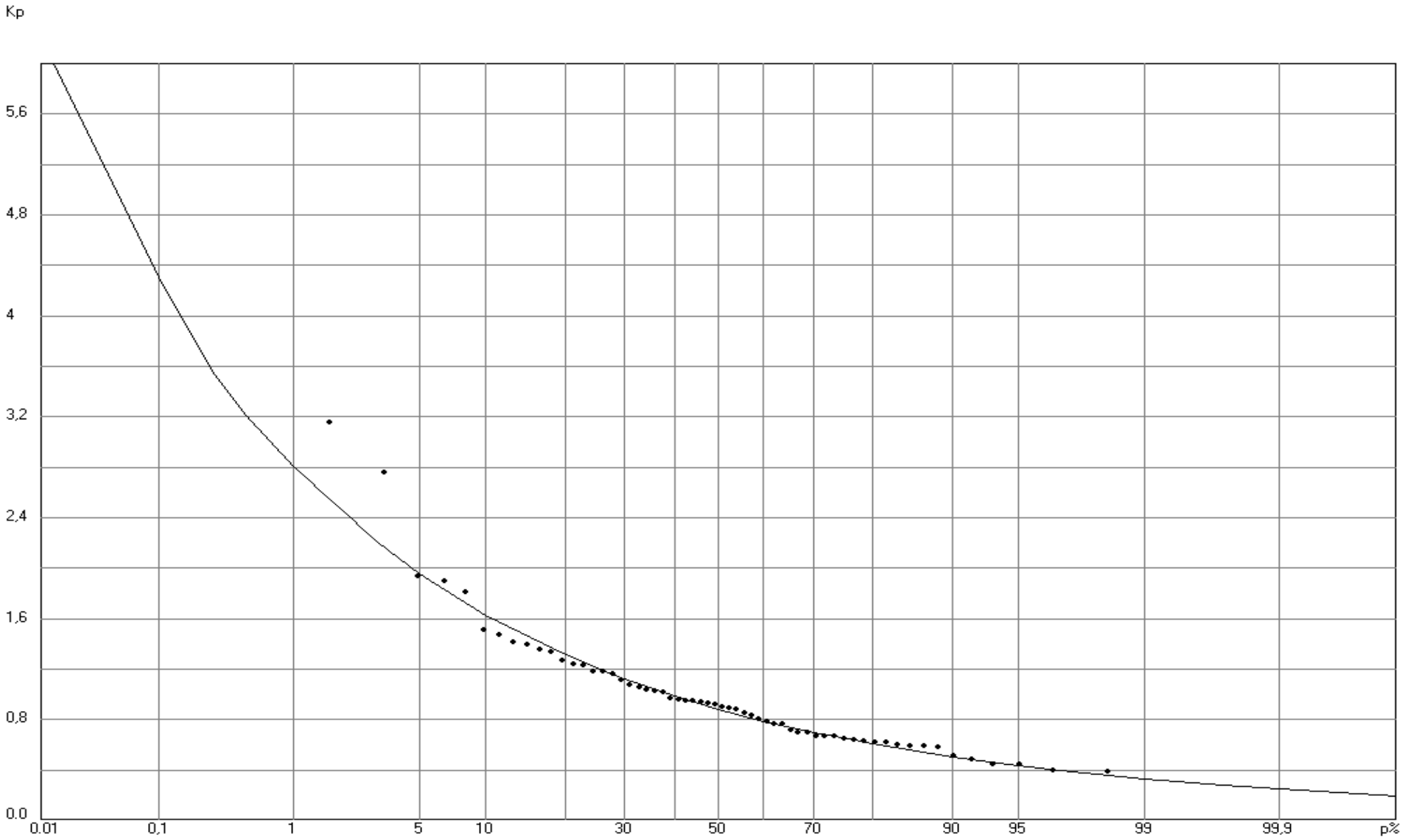
Приложение А 19

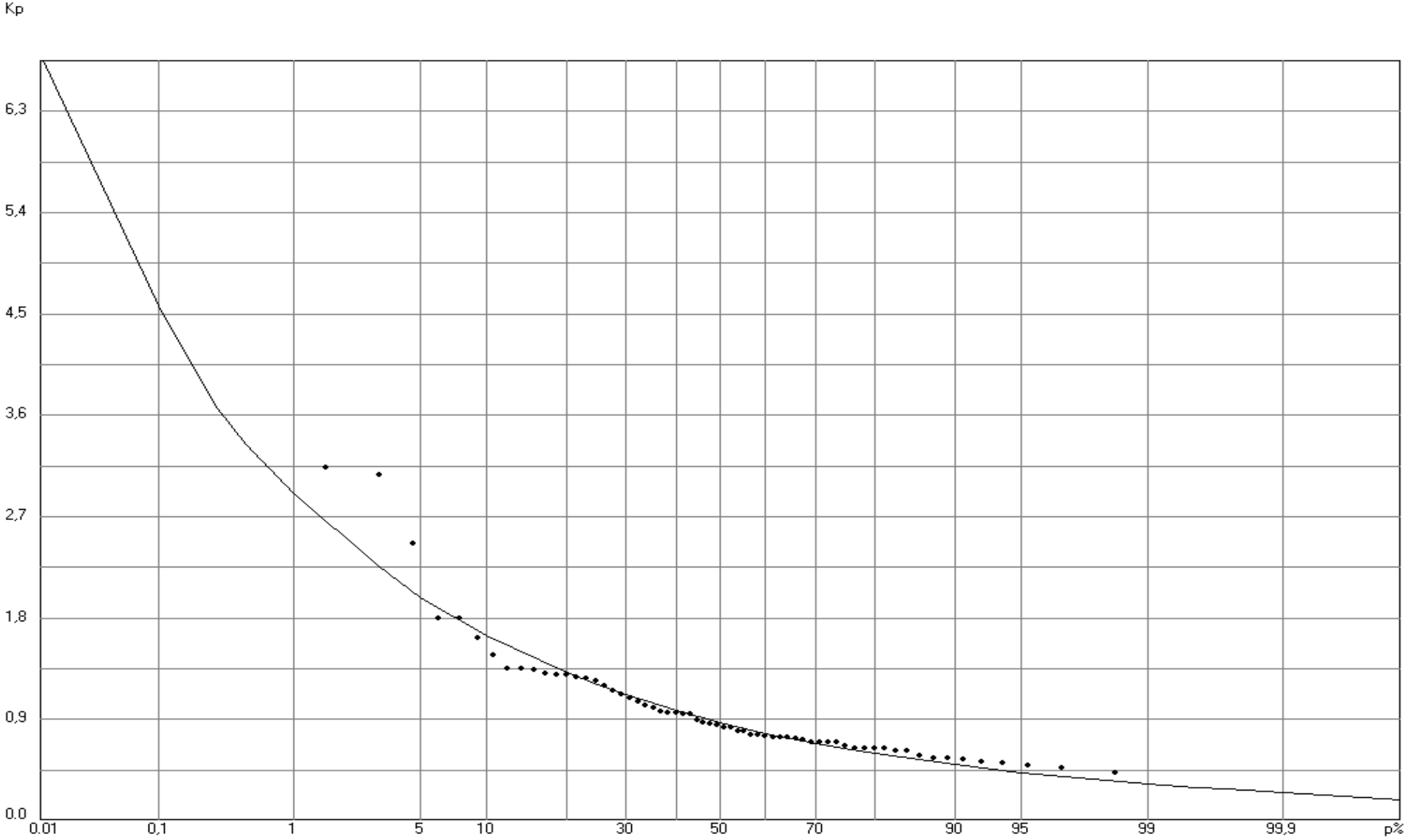
Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Великая – Пятоново



Приложение А 20

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Великая – Опочка



Приложение А 21

Эмпирическая и аналитическая кривые Крицкого-Менкеля р. Великая – Гуйтово