

Регрессионные модели кислотно-основных свойств торфяных болот как оперативные критерии их классификации по химическому принципу

Т. Т. ЕФРЕМОВА, А. Ф. АВРОВА

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН,
Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: efr2@ksc.krasn.ru*

Статья поступила 23.11.2018

После доработки 18.01.2019

Принята к печати 22.01.2019

АННОТАЦИЯ

По типу линейной функции установлены количественные связи активной кислотности (pH_{H_2O}) торфяных почв с величиной обменной (pH_{KCl}) и гидролитической (общей) кислотности, содержанием обменных катионов и щелочноземельных оснований, а также со степенью насыщенности основаниями. Приведены коэффициенты полученных уравнений регрессии. Доказаны высокие прогностические возможности регрессионных моделей на примере независимых данных. Применение регрессионных уравнений избавляет от выполнения трудоемких аналитических работ, что позволяет оперативно осуществлять классификацию болот и торфяных почв по химическому принципу – насыщенности щелочноземельными основаниями и величине pH. Индикаторная роль ботанического состава может заслуживать доверия при условии невысокой степени разложения торфа и специальных знаний морфологии и анатомии сфагновых мхов и сосудистых болотных растений.

Ключевые слова: болота, торфяные почвы, кислотность среды, обменные основания, диагностика, парный регрессионный анализ.

Кислотно-основные свойства гидроморфных местообитаний определяют генетические особенности болот и торфообразования: видовой состав фитоценозов, тип торфяной залежи, направленность трансформации органического вещества, скорость и специфику всех биогеоценологических процессов в почвенной компоненте (зона торфогенеза). При этом кислотность среды на болотах обуславливается главным образом минерализацией питающих их вод и, прежде всего, обогащенностью кальцием [Пьявченко, 1978а; Sjörs, © Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., 2019

Gunnarsson, 2002]. Торфяные месторождения в разных типологических сочетаниях распространены в пределах всех климатических зон, однако наибольшее их число находится в зоне умеренного климата, в изобилии – на территории России. Рациональное использование торфяных болот в сельском и лесном хозяйстве, промышленности, биохимии, здравоохранении, микробиологии и других отраслях базируется на разработанных принципах и структуре классификации торфяных месторождений и почв, необходимых для сохранения экологического равновесия

в биосфере и охраны уникальных торфяных месторождений. Наиболее крупное подразделение классификации, учитывающее условия формирования торфа и определяющие его генезис, – тип торфа (верховой, переходный, низинный), в границах которого объединяются подтипы и группы торфов [Торфяные ресурсы..., 1988].

Установлено, что торф с зольностью до 12 % по содержанию в нем кальция, степени насыщенности основаниями и величине pH хорошо дифференцируется в пределах типов [Никонов, 1960]. В качестве обобщающего (результатирующего) обоснован показатель степени насыщенности торфа поглощенными щелочноземельными основаниями, значение которого и факт диагностики можно корректировать величиной pH [Пьявченко, Корнилова, 1978]. На этой химической основе разработана диагностика осушенных болотных почв [Морозова, 1986]. Объективность классификации торфяных почв по принципу насыщенности основаниями подтверждена исследованиями качественного состояния органического вещества: установлена специфика группового и фракционного состава и своеобразии гумусного состояния типов почв – верховые (олиготрофные), переходные (мезотрофные), низинные (эутрофные), и подтипов – верхово-переходные и переходно-низинные [Ефремова, 1992]. О необходимости положить в основу построения классификации торфяных почв состав органической массы и насыщенность их минеральными элементами в связи с характером водно-минерального питания находим уже в ранних работах И. Н. Скрынниковой [1954], посвятившей многие годы разработке эколого-генетической классификации и систематике торфяно-болотных почв. Однако в отделе торфяных почв официальной классификации мезотрофный тип почв до сих пор отсутствует [Классификация..., 2004]. Между тем переходный (мезотрофный) тип торфа как реально существующий в природных комплексах целесообразно включить в классификацию торфяных почв на уровне типа наравне с низинными и верховыми [Пьявченко, Корнилова, 1978; Инишева, 2006].

Для характеристики кислотно-основных свойств почв достаточными принято считать следующие признаки: активная кислотность pH_{H_2O} , обменная кислотность $pH_{КС}$, гидро-

литическая кислотность, сумма поглощенных оснований, степень насыщенности основаниями, поглощенные (Ca + Mg). Аналитическое определение каждого из перечисленных показателей (приготовление соответствующих реактивов, взятие отдельной навески, учет гигроскопической влаги, отбор аликвоты, последующее титрование, взвешивание, настройка потенциометра, выполнение расчетов и т. д.) – процесс довольно продолжительный. Значительно сократить трудозатраты поможет, в частности, регрессионный анализ как один из методов статистического моделирования. Уравнение связи признается моделью и может использоваться в целях прогнозирования, если статистически значимы и параметры уравнения, и уравнение в целом [Дрейпер, Смит, 1986].

Математическая формализация выполнялась с целью прогнозирования одного кислотно-основного признака по значению другого, чтобы получить данные, реально близкие результатам непосредственного аналитического определения. В качестве предиктора (аргумента) использовали величину pH водной вытяжки (pH_{H_2O}) как наименее трудоемкую операцию. Применили парный регрессионный анализ. При построении качественного регрессионного уравнения выполнялись следующие этапы:

- выбор типа функции для описания изучаемой зависимости (спецификация);
- определение параметров выбранного уравнения регрессии (параметризация);
- анализ качества уравнения – оценка статистической значимости параметров уравнения и уравнения в целом, проверка его адекватности эмпирическим данным (верификация);
- испытание предсказательной способности регрессионного уравнения для целей конкретного прогноза (валидация).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили шесть торфяных массивов, сформированных в заболоченных долинах бассейнов рек Белый и Черный Июс на различных абсолютных высотах восточного макросклона Кузнецкого Алатау (Республика Хакасия). Два из них (Арарат и Пихтерек) залегают в высокогорной области (1460 и 1087 м над ур. м.). Остальные

(Бюра, Тунгужуль, Печище и Тарча) – в плоскогорье (гипсометрическая ступень рельефа 400–800 м над ур. м.). Торфяники различных высотных поясов питаются в основном подземными водами, которые выходят на поверхность благодаря резкой расчлененности рельефа, неодинаковой степени трещиноватости горных пород и наличию тектонических разломов. Разгрузка вод происходит обычно по горным склонам и речным долинам, которые, как правило, заболочены.

Заболоченные речные долины заняты преимущественно хвойными и хвойно-лиственными древостоями с доминированием ели сибирской (*Picea obovata* Zedeb.). Преобладают разновозрастные ельники гипново-зеленомошной группы типов леса. В ассоциациях напочвенного покрова господствующий ярус мхов занимает 90–95 %. Доминируют: *Tomenthypnum*, *Aulacomnium*, *Helodium*, *Drepanocladus*, *Calliergon*, *Pleurozium*, *Polytrichum*, *Hylacomium*, *Dicranum Retidiadelphus*, *Tuidium*, *Brium*, *Ptilium*.

Исследованиями охвачена современная почва – корнено насыщенная зона торфяной залежи 0–30 (40) см, которая ограничивалась, в том числе, наличием в профиле мерзлотных горизонтов. Для отбора образцов почв вырезались торфяные монолиты размером 25 × 25 × 30(40) см и подразделялись на генетические горизонты. На каждом из шести объектов отобрано по 3–4 монолита сообразно доминирующим растительным ассоциациям. Каждый почвенный образец анализировался в двух весовых повторностях.

Аналитические определения кислотно-основных показателей выполнялись согласно методикам, изложенным в руководстве [Аринушкина, 1970]: актуальная кислотность (рН водной вытяжки), обменная кислотность (рН вытяжки 1М KCl), величина гидролитической (общей) кислотности в вытяжке 1М CH_3COONa умножалась на коэффициент 1,75 (полнота вытеснения H^+). Сумма обменных катионов – в вытяжке 0,1М HCl (по Каппену – Гильковицу). В этой же вытяжке определяли сумму обменных оснований (Ca + Mg) трилонометрическим методом. Степень насыщенности торфяных почв основаниями оценивали как долю (Ca + Mg) к емкости поглощения (сумма обменных катионов + гидролитическая кислотность). Многомерный статистический анализ

выполнен в программе EXCEL и STATISTICA-6 по руководству [Халафян, 2007].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заболоченные речные долины слагаются олиготрофными, олигомезотрофными, мезоэутрофными и эутрофными типами и подтипами торфяных почв (классификация по: [Пьявченко, Корнилова, 1978]). Они сформированы торфами моховой группы, зольность которых в основном выше конституционной > 12 % (табл. 1). Объемная масса изменяется соответственно и широко варьирует. Существенно колеблются и кислотно-основные показатели торфяных почв. Так, массив Арарат обладает кислой реакцией, высокой гидролитической кислотностью и сильной ненасыщенностью торфяного субстрата основаниями: в составе почвенного поглощающего комплекса доля кальция и магния составляет < 30 %. Почвенный профиль торфяника Пихтерек, подобно Арарату, характеризуется кислой реакцией среды и ненасыщен щелочноземельными основаниями. Почвенный поглощающий комплекс массива Бюра отличается слабокислой реакцией и слабонасыщен основаниями. Массивы Печище и Тарча слагаются умеренно насыщенными (Ca + Mg) торфами в границах слабокислой и близкой к нейтральной реакции среды. Кислотный след почвообразования торфяного массива Тунгужуль в умеренно- и сильнонасыщенных основаниями горизонтах, которые отличаются самой низкой гидролитической кислотностью, смещается в область нейтральных и слабощелочных значений рН.

Таким образом, широкий диапазон кислотно-основных показателей торфяных почв позволяет в системе представленных данных определить количественные зависимости наблюдаемых величин в рамках регрессионной модели.

ОБСУЖДЕНИЕ

По величине актуальной кислотности ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) с помощью процедур однофакторного регрессионного анализа выполнено прогнозирование значений обменной кислотности (pH_{KCl}), гидролитической (общей) кислотности, суммы обменных катионов, суммы обменных оснований (Ca + Mg) и степени насыщенности торфяных почв основаниями. Связь

Т а б л и ц а 1

**Физико-химическая характеристика торфяных почв заболоченных речных долин
восточного макросклона Кузнецкого Алатау**

Физико-химический показатель	Торфяные массивы, абсолютная высота, м					
	Арагат, 1460	Пихтерек, 1087	Бюря, 832	Тунгужуль, 622	Печище, 579	Тарча, 547
Зольность, %	$\frac{6,2-58,9}{28,0}$	$\frac{6,9-16,9}{12,0}$	$\frac{5,5-34,5}{16,2}$	$\frac{6,9-42,0}{18,7}$	$\frac{9,3-50,7}{25,3}$	$\frac{4,9-50,6}{24,9}$
Плотность, г/см ³	$\frac{0,028-0,203}{0,100}$	$\frac{0,043-0,073}{0,058}$	$\frac{0,039-0,125}{0,070}$	$\frac{0,043-0,148}{0,078}$	$\frac{0,050-0,174}{0,098}$	$\frac{0,044-0,172}{0,098}$
pH _{H₂O}	$\frac{4,6-4,9}{4,7}$	$\frac{4,9-5,6}{5,2}$	$\frac{4,7-6,8}{5,9}$	$\frac{6,7-7,7}{7,2}$	$\frac{6,1-6,5}{6,3}$	$\frac{5,6-6,8}{6,2}$
pH _{KCl}	$\frac{3,7-4,1}{3,8}$	$\frac{3,8-4,9}{4,3}$	$\frac{4,1-6,3}{5,3}$	$\frac{5,6-6,9}{6,4}$	$\frac{5,6-5,9}{5,8}$	$\frac{5,0-6,2}{5,6}$
Hг*, смоль(экв.)/кг	$\frac{71,5-85,9}{81,7}$	$\frac{43,9-82,5}{63,4}$	$\frac{17,1-73,7}{43,1}$	$\frac{3,5-13,5}{8,3}$	$\frac{17,8-31,3}{24,3}$	$\frac{7,1-46,7}{25,9}$
Σ катионов, смоль(экв.)/кг	$\frac{133,3-144,7}{137,1}$	$\frac{134,9-195,0}{154,5}$	$\frac{110,1-333,0}{241,8}$	$\frac{203,0-387,0}{294,9}$	$\frac{140,0-292,5}{210,6}$	$\frac{190,5-307,2}{251,6}$
Σ (Ca + Mg), смоль(экв.)/кг	$\frac{44,9-62,5}{51,0}$	$\frac{43,6-98,2}{65,6}$	$\frac{86,4-272,1}{174,3}$	$\frac{149,1-357,0}{264,2}$	$\frac{112,2-270,0}{183,1}$	$\frac{122,3-249,2}{188,8}$
Насыщенность (Ca + Mg), %	$\frac{20,5-28,9}{23,3}$	$\frac{19,7-42,4}{30,5}$	$\frac{35,4-84,2}{60,6}$	$\frac{70,5-93,8}{85,8}$	$\frac{66,1-87,1}{76,3}$	$\frac{51,5-79,3}{66,8}$

П р и м е ч а н и е. Hг* – гидролитическая кислотность, числитель – лимит, знаменатель – среднее.

обсуждаемых показателей аппроксимируется линейными регрессионными моделями высокого качества, судя по коэффициентам детерминации (R^2), которые объясняют 87–98 % разброса значений кислотно-основных показателей относительно средних, а также статистической значимости F -критерия моделей в целом и параметров уравнений (табл. 2).

Наряду с графиками разброса неотъемлемой частью регрессионного анализа являются диаграммы анализа остатков. Процедура анализа остатков (разностей между экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по регрессионному уравнению) выполняется с целью проверить адекватность построенных моделей, т. е. установить, соот-

Т а б л и ц а 2

Верификация парных регрессионных моделей связи кислотно-основных показателей торфяных почв с активной кислотностью (pH_{H₂O}) по типу линейной функции

R^2	F -критерий	Уравнение в целом		p -Уровень значимости параметров уравнения*	
		p -Уровень	Среднеквадратичная ошибка	Регрессионный коэффициент	Константа
Обменная кислотность pH _{KCl}					
0,93	940	<0,001	0,23	<0,001	<0,001
Гидролитическая (общая) кислотность, смоль(экв.)/кг					
0,98	1769	<0,001	3,26	<0,001	<0,001
Сумма обменных катионов, смоль(экв.)/кг					
0,87	343	<0,001	30,66	<0,001	<0,001
Сумма обменных оснований (Ca+Mg), смоль(экв.)/кг					
0,86	478	<0,001	37,7	<0,001	<0,001
Степень насыщенности основаниями (Ca + Mg), %					
0,87	599	<0,001	9,1	<0,001	<0,001

*Параметры регрессионных моделей см. в тексте.

ветствуют ли модели натурным данным и выполняются ли условия применения метода наименьших квадратов. В случае правильно подобранной модели вычисленные остатки характеризуются однородностью дисперсий (гомоскедастичностью), являются независимыми от предиктора и соответствуют нормальному распределению. Построенные диаграммы показывают, что остатки примерно одинаково принимают как положительные, так и отрицательные значения, не проявляют тенденции к росту с увеличением pH_{H_2O} (независимого показателя) и не обнаруживают с ним выраженной зависимости: $r = 0,13 - 0,96 \cdot 10^{-7}$ (рис. 1, а, в, д, ж, и), т. е. остатки гомоскедастичны. Для проверки нормальности распределения ошибок построены диаграммы вероятностей нормального распределения. Согласно [Дрейпер, Смит, 1986], хорошо подобранная прямая нормального распределения для оценки стандартизованных остатков должна проходить через точку с координатами 0-0 по оси ординат и абсцисс, что и наблюдаем на рис. 1, б, г, е, з, к. Остатки лежат или на линии нормального распределения, или вплотную приближаются к ней, а некоторое отклонение от линии невелико, т. е. условие нормального распределения ошибок нарушается незначительно.

Таким образом, процедура анализа остатков дает основание утверждать: условия применимости метода наименьших квадратов выполняются и параметры линейной регрессии, при оценке которых применяется метод наименьших квадратов, могут использоваться для прогноза кислотно-основных показателей. Весовые коэффициенты уравнений регрессии – свободный член (константа) и регрессионный коэффициент (величина, на которую в среднем изменяется прогнозируемый признак при изменении независимого на установленную единицу измерения), являются высокозначимыми: $p < 0,001$ (см. табл. 2).

Относительная ошибка аппроксимации построенных моделей рассчитывалась по формуле [Елисеева и др., 2003]:

$$A = \left| \frac{y - y_p}{y} \right| \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где A – относительная ошибка аппроксимации, %; y – аналитические данные кислотно-основных показателей; y_p – их расчетные

значения; $|y - y_p|$ – величины, соответствующие модулю. Значения средней относительной ошибки аппроксимации в пределах 10 % свидетельствуют о хорошем соответствии линии регрессии исходным аналитическим данным.

Положительная линейная зависимость между актуальной и обменной кислотностью, которая иллюстрируется диаграммой разброса (рис. 2, а), аппроксимируется следующим регрессионным уравнением:

$$pH_{KCl} = 1,18 \cdot pH_{H_2O} - 1,71. \quad (2)$$

Согласно полученной модели, увеличение значений актуальной кислотности на единицу сопровождается ростом величины обменной кислотности (pH_{KCl}) в среднем на 1,18. Доверительный интервал, который задает область вокруг среднего, составляет 1,10–1,26, т. е. истинное среднее содержится внутри данного доверительного интервала и с 95%-й вероятностью лежит выше 1,10 и ниже 1,26. Средняя ошибка аппроксимации составляет 4 % и изменяется в пределах 2–5 %, что соответствует высокой точности прогноза (см. рис. 2, б). Регрессионная модель построена в пределах величины pH_{H_2O} 4,7–7,2 и применима только к этому интервалу значений.

Для проверки работоспособности регрессионного уравнения (валидации) использованы данные по активной и потенциальной кислотности торфяных почв восточного склона Кузнецкого Алатау и южно-таежной подзоны Западной Сибири, которые не участвовали в моделировании. Величина pH_{H_2O} контрольных торфяных почв изменяется в пределах 4,6–6,8, что соответствует диапазону моделирования, обозначенному в табл. 1. Достаточно высокие прогностические свойства модели демонстрирует рис. 2, в. Согласно рисунку, разброс аналитических данных величины pH_{KCl} относительно модельной линии регрессии незначительный и находится в границах 95%-х доверительных интервалов регрессионного уравнения.

Отрицательная линейная связь актуальной и гидролитической кислотности в пределах от кислой до нейтральной реакции среды в торфяных почвах, иллюстрируемая диаграммой разброса (рис. 3, а), аппроксимируется следующей регрессионной моделью:

$$Hг = -33,0 \cdot pH_{H_2O} + 231,5, \quad (3)$$

где $Hг$ – гидролитическая кислотность, смоль(экв.)/кг. Согласно уравнению, увеличе-

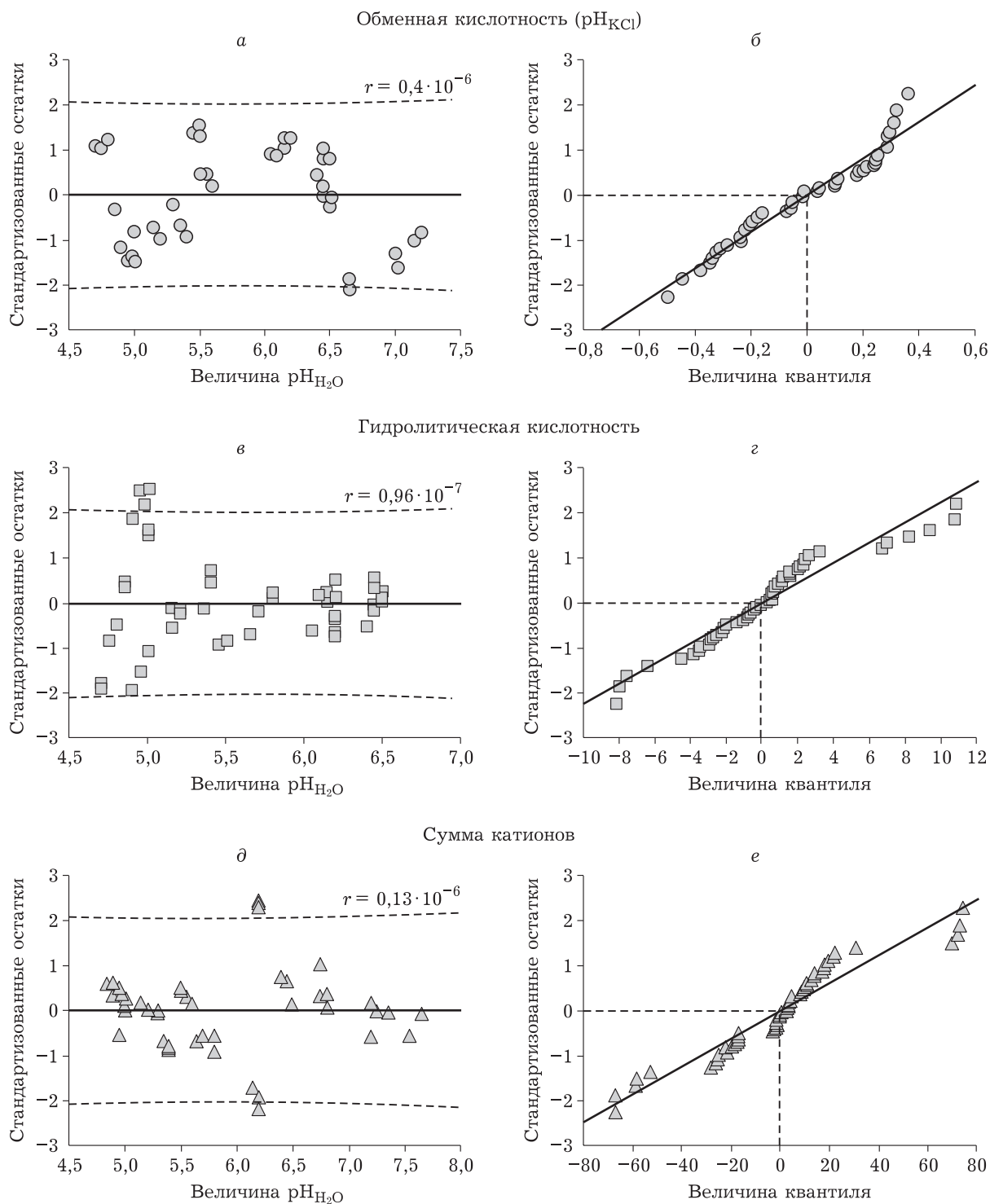


Рис. 1. (начало)

ние показателя актуальной кислотности на единицу сопровождается снижением гидролитической кислотности в среднем на 33 смоль(экв.)/кг. Доверительный интервал регрессионного коэффициента составляет $-34,6 \dots -31,4$ смоль(экв.)/кг. Ошибка

аппроксимации составляет в среднем 5 %, варьируя в пределах 1–6 % (см. рис. 3, б). Линейная регрессионная модель применима в интервале значений pH_{H_2O} 4,7–6,5.

Объектом для валидации линейной регрессионной модели послужили данные актуаль-

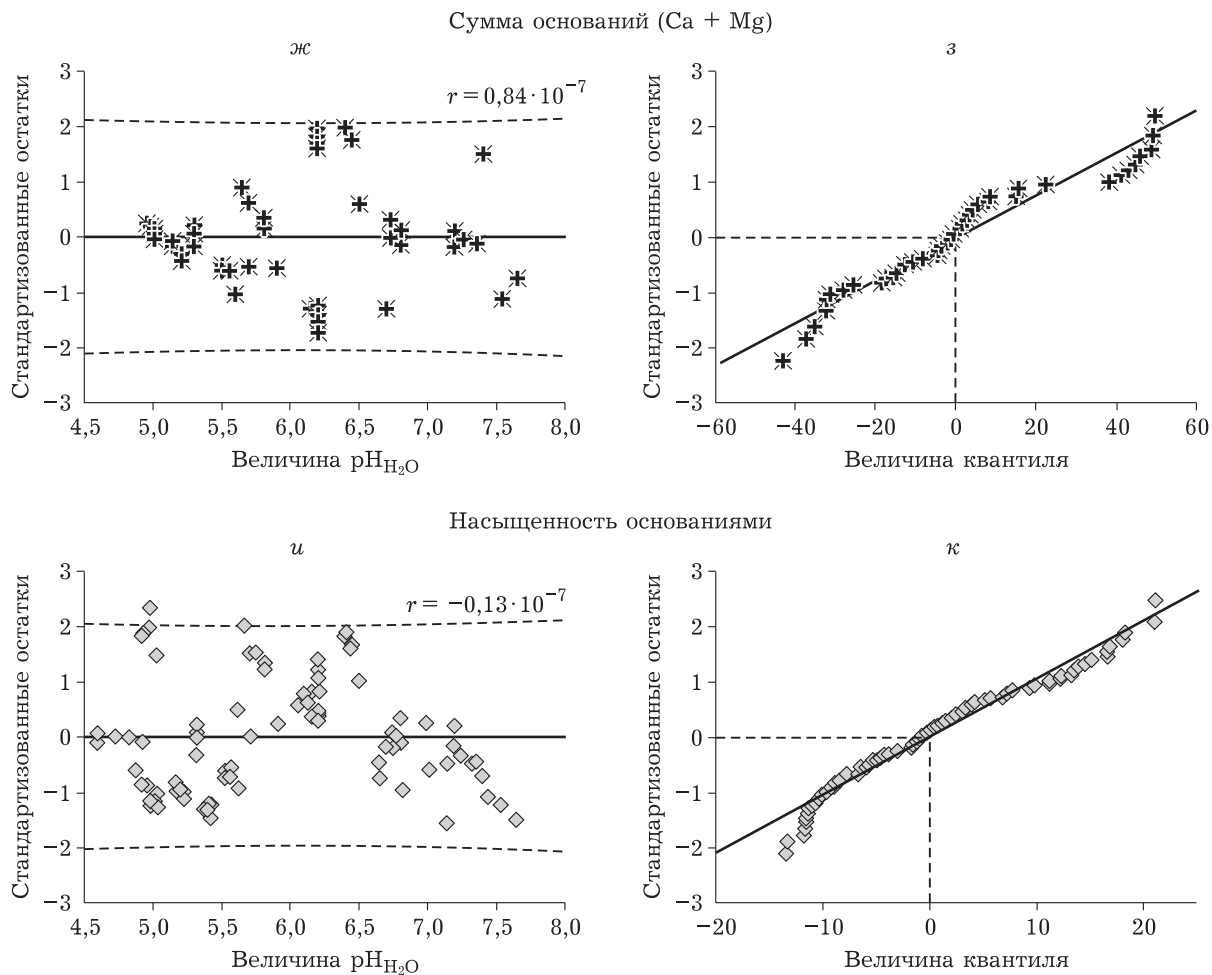


Рис. 1. (окончание). Диаграммы остатков пригодности линейных регрессионных моделей: а, в, д, ж, и – оценка постоянства дисперсии остатков (гомоскедастичности); б, г, е, з, к – вероятности нормального распределения

ной (4,7–6,7) и гидролитической кислотности (11,2–82,5 смоль(экв.)/кг) торфяной почвы, не используемые в моделировании. Аналитические данные контрольных торфяных почв располагаются в пределах или в непосредственной близости к границам 95%-х доверительных интервалов для линии регрессии, что свидетельствует об удовлетворительных прогностических свойствах модели (см. рис. 3, в).

За пределами нейтральной среды равномерное изменение уровня гидролитической кислотности нарушается, и по мере смещения в сторону щелочного интервала скорость ее увеличения снижается по экспоненциальному закону, а уравнение связи принимает вид $Hг = 4667,2e^{-0,844 \cdot pH_{H_2O}}$, $R^2 = 0,96$; $p < 0,001$.

Положительная линейная связь показателя pH_{H_2O} и суммы обменных катионов, которая представлена диаграммой разброса (рис. 4, а),

аппроксимируется регрессионной моделью следующего вида:

$$S = 97,2 \cdot pH_{H_2O} - 353,8, \quad (4)$$

где S – сумма обменных катионов, смоль(экв.)/кг. Согласно уравнению, увеличение показателя актуальной кислотности на единицу сопровождается ростом обменных катионов в среднем на 97,2 смоль(экв.)/кг. Доверительный интервал регрессионного коэффициента – 86,7–107,7 смоль(экв.)/кг. Ошибка аппроксимации составляет в среднем 7 %, варьирует в пределах 2–10 % и минимальна в щелочном диапазоне (см. рис. 4, б). Регрессионное уравнение применимо в интервале значений pH_{H_2O} 4,9–7,6.

Валидация регрессионной модели выполнена по данным актуальной кислотности 4,7–6,5 и суммы катионов 159–317 смоль(экв.)/кг торфяной почвы, не участвовавших в моделировании. Разброс аналитических данных относительно линии регрессии небольшой, и они

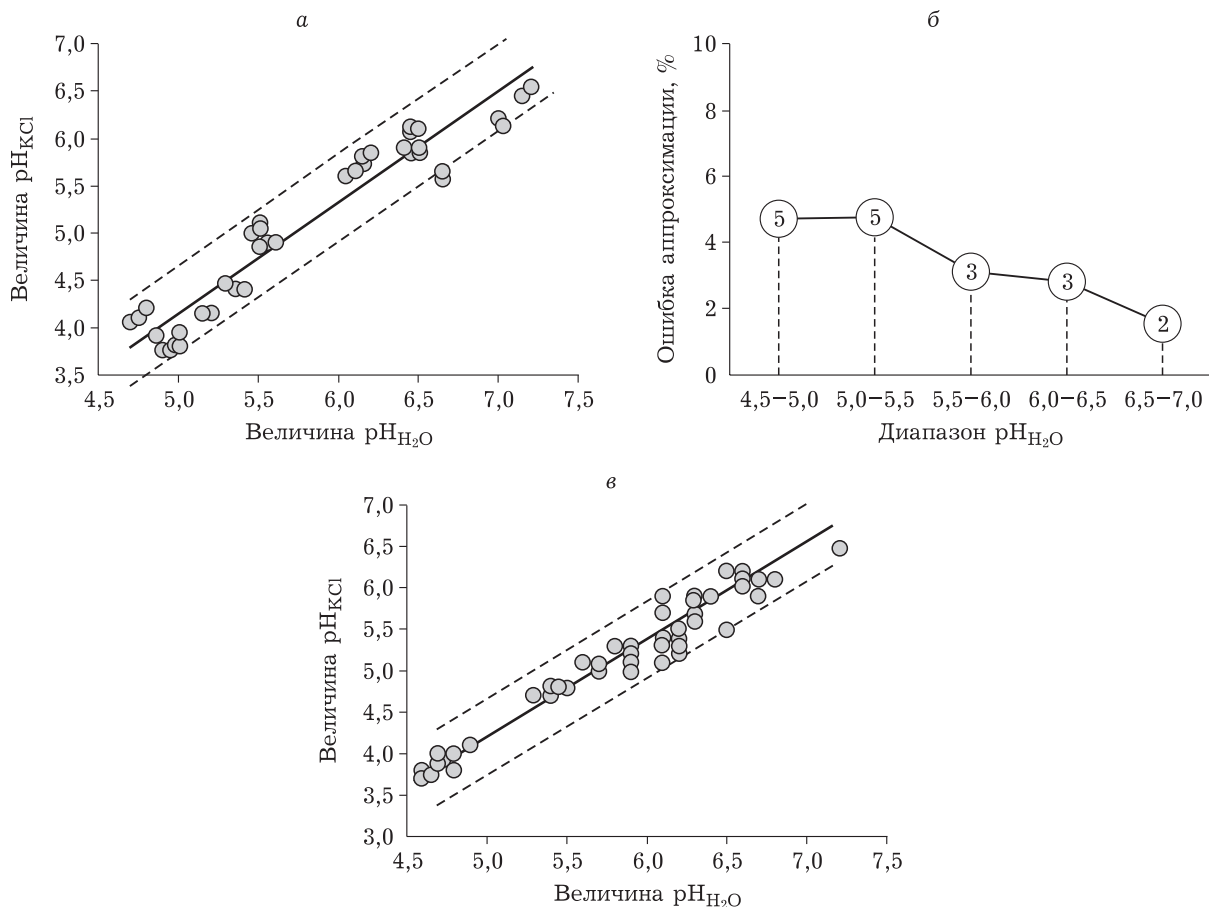


Рис. 2. Регрессионная связь фактической (pH_{H₂O}) и обменной (pH_{KCl}) кислотности. Здесь и на рис. 3–6: а – диаграмма разброса и линия регрессии, б – оценка точности прогноза ли нейной регрессионной модели, в – валидация модели

находятся в границах 95%-х доверительных интервалов регрессионного уравнения (см. рис. 4, в), что подтверждает хорошие прогностические свойства модели.

Положительная линейная связь активной кислотности и содержания обменных оснований (Ca + Mg), согласно диаграмме разброса (см. рис. 5, а), аппроксимируется регрессионной моделью следующего вида:

$$(Ca + Mg) = 105,8 \cdot pH_{H_2O} - 470,2, \quad (5)$$

где (Ca + Mg) – сумма обменных оснований, смоль(экв.)/кг. Согласно уравнению, увеличение показателя фактической кислотности на единицу сопровождается ростом обменных оснований в среднем на 105,8 смоль(экв.)/кг. Доверительный интервал регрессионного коэффициента – 96,1–115,4 смоль(экв.)/кг. Ошибка аппроксимации составляет в среднем 7 % и варьирует в пределах 5–10 % (см. рис. 5, б). Линейная регрессионная модель применима в интервале значений pH_{H₂O} 4,6–7,9.

Валидация регрессионной модели выполнена на примере торфяной почвы по данным фактической кислотности в пределах 4,9–6,7 и суммы обменных (Ca + Mg) 78,5–226,7 смоль(экв.)/кг, что соответствует диапазону моделирования. Предсказанные значения располагаются на диаграмме в границах 95%-х доверительных интервалов линии регрессии, подтверждая объективность построенной модели (см. рис. 5, в).

Положительная линейная связь активной кислотности и степени насыщенности основаниями (Ca + Mg), представленная на диаграмме разброса (рис. 6, а), аппроксимируется в торфяных почвах регрессионной моделью следующего вида:

$$V = 27,3 \cdot pH_{H_2O} - 103,9, \quad (6)$$

где V – степень насыщенности основаниями (Ca + Mg), %. Согласно уравнению, увеличение показателя фактической кислотности на единицу сопровождается ростом насыщен-

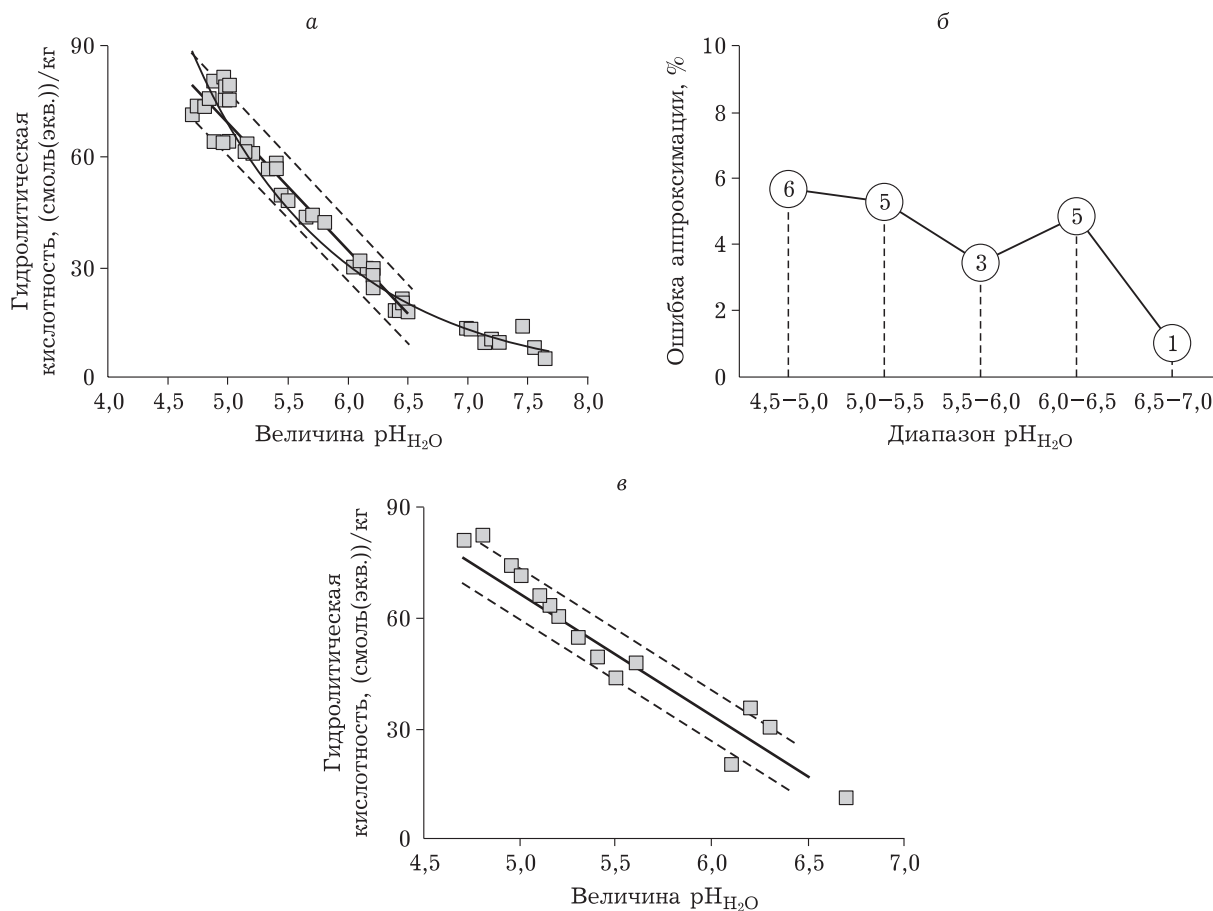


Рис. 3. Регрессионная связь фактуальной (pH_{H₂O}) и гидролитической кислотности: а, б, в – см. рис. 2

ности почв (Ca + Mg) в среднем на 27,3 %. Доверительный интервал регрессионного коэффициента составляет 25,0–29,5 %, т. е. истинное среднее содержится внутри данного доверительного интервала и с 95%-й вероятностью лежит выше 25 и ниже 29,5 %. Ошибка аппроксимации составляет в среднем 5 % и варьирует от 3 до 8 % (см. рис. 6, б). Линейная регрессионная модель применима в интервале значений pH_{H₂O} 4,6–7,7.

Проверка работоспособности регрессионной модели выполнена на примере торфяных почв в диапазоне величин фактуальной кислотности 4,55–6,65 и степени насыщенности (Ca + Mg) 34,4–70,3 %. На диаграмме разброс предсказанных значений не выходит за пределы 95%-х доверительных интервалов линии регрессии, что подтверждает хорошие прогностические свойства построенной модели (см. рис. 6, в).

Таким образом, рассчитанные линейные модели связи, работоспособность (степень пригод-

ности) которых подтверждена контрольными образцами, могут объективно использоваться в расчетах кислотно-основных показателей, ограничившись при этом аналитическим определением только одного признака – активной кислотности торфяных почв (pH_{H₂O}).

Определение активной кислотности торфяных почв. Методика определения величины pH_{H₂O} излагается в соответствии с руководством [Аринушкина, 1970], а также многолетним личным опытом аналитической работы. Навеска торфяной почвы, измельченная и пропущенная через сито диаметром 0,5 мм, помещается в колбу 50–100 мл и заливается бидистиллированной водой, прокипяченной предварительно в течение 30 мин. Соотношение почвы к воде 1 : 25. После встряхивания (примерно 5 мин) колба оставляется на 18–24 ч. В отстоявшемся растворе определяют величину pH с помощью потенциометра.

Диагностика торфяных почв по принципу насыщенности основаниями. По величине

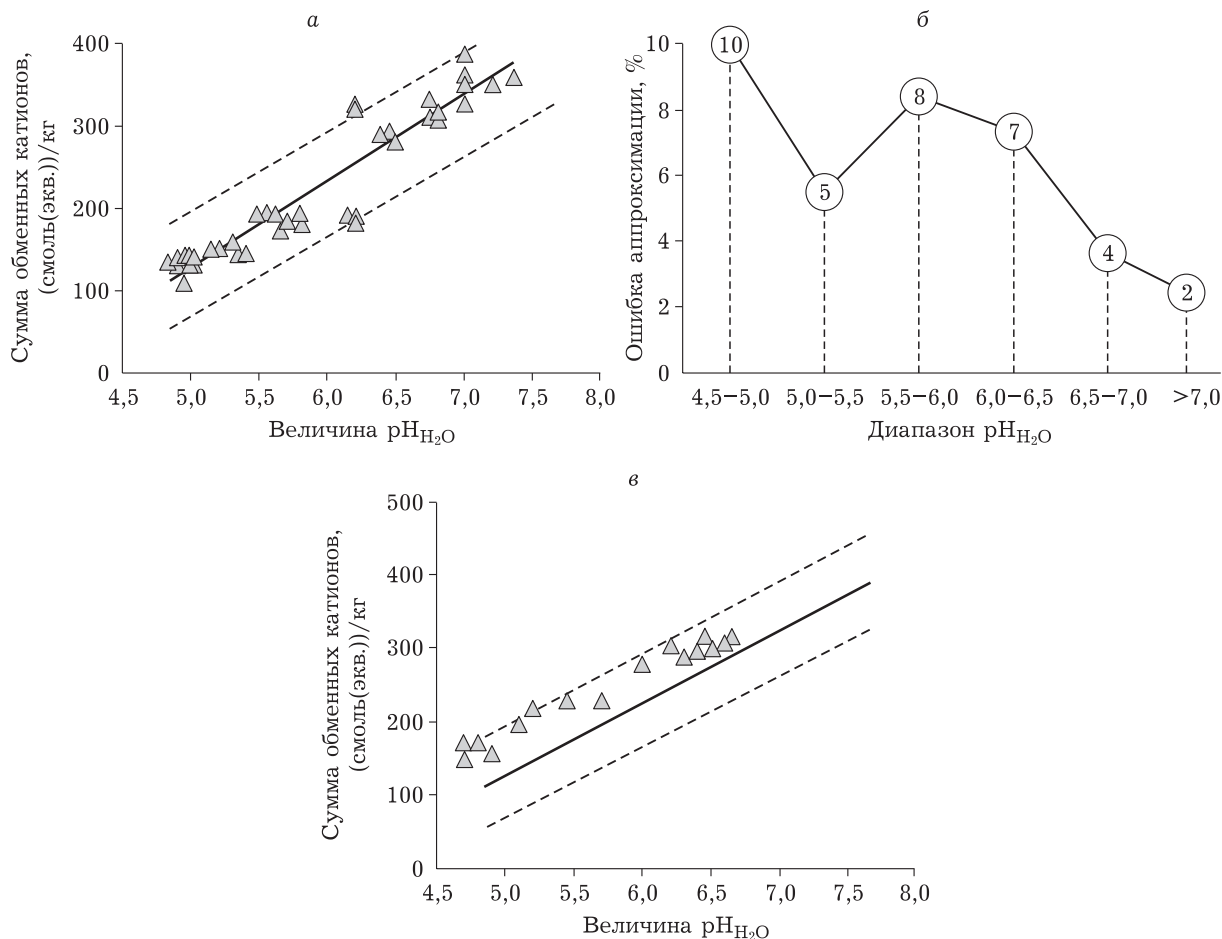


Рис. 4. Регрессионная связь актуальной кислотности ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) и суммы катионов: а, б, в – см. рис. 2

$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ рассчитывается (согласно моделям) степень насыщенности основаниями торфяных почв и в соответствии с критериями, предложенными Н. И. Пьявченко, выполняется их диагностика [Пьявченко, 1978б]. Типы торфяных почв: менее 30 % – верховой (олиготрофный), 30–65 % – переходный (мезотрофный), свыше 65 % – низинный (эутрофный), промежуточные между ними подтипы: 26–38 % – верхово-переходный (олигомезотрофный), 61–70 % – переходно-низинный (мезоэутрофный). Величина обменной кислотности дополнительно корректирует полученные результаты: pH_{KCl} 2,6–3,4(3,5) – почвы верхового типа, 3,0–4,4(4,5) – переходного, pH_{KCl} выше 4,5 – низинного типа. Некоторое перекрытие показателей отражает явление континуума (постепенность перехода) как в сообществе растений-торфообразователей, так и образованных ими почвах, поэтому определенная условность границ неизбежна.

Критерии торфов по принципу насыщенности основаниями являются объективными, не изменяются в зависимости от географического положения объекта и в целом согласуются с результатами ботанического анализа [Пьявченко, 1978б], который также рассматривается показателем типовой принадлежности торфов [Лопатин, 1972; Jeglum, 1995; Losky, 2005]. Однако столь дробное деление на типы и подтипы торфов по ботаническому составу практически невыполнимо в силу высокой толерантности к условиям среды, в частности, сфагновых мхов, которые образуют олиготрофную, мезотрофную и эутрофную экологические группы [Пьявченко, Корнилова, 1978]. Кроме того, чем сильнее преобразован торф, тем менее надежной становится идентификация видовой принадлежности сохранившихся растительных остатков, которая требует к тому же специальных знаний и практических навыков по морфологии

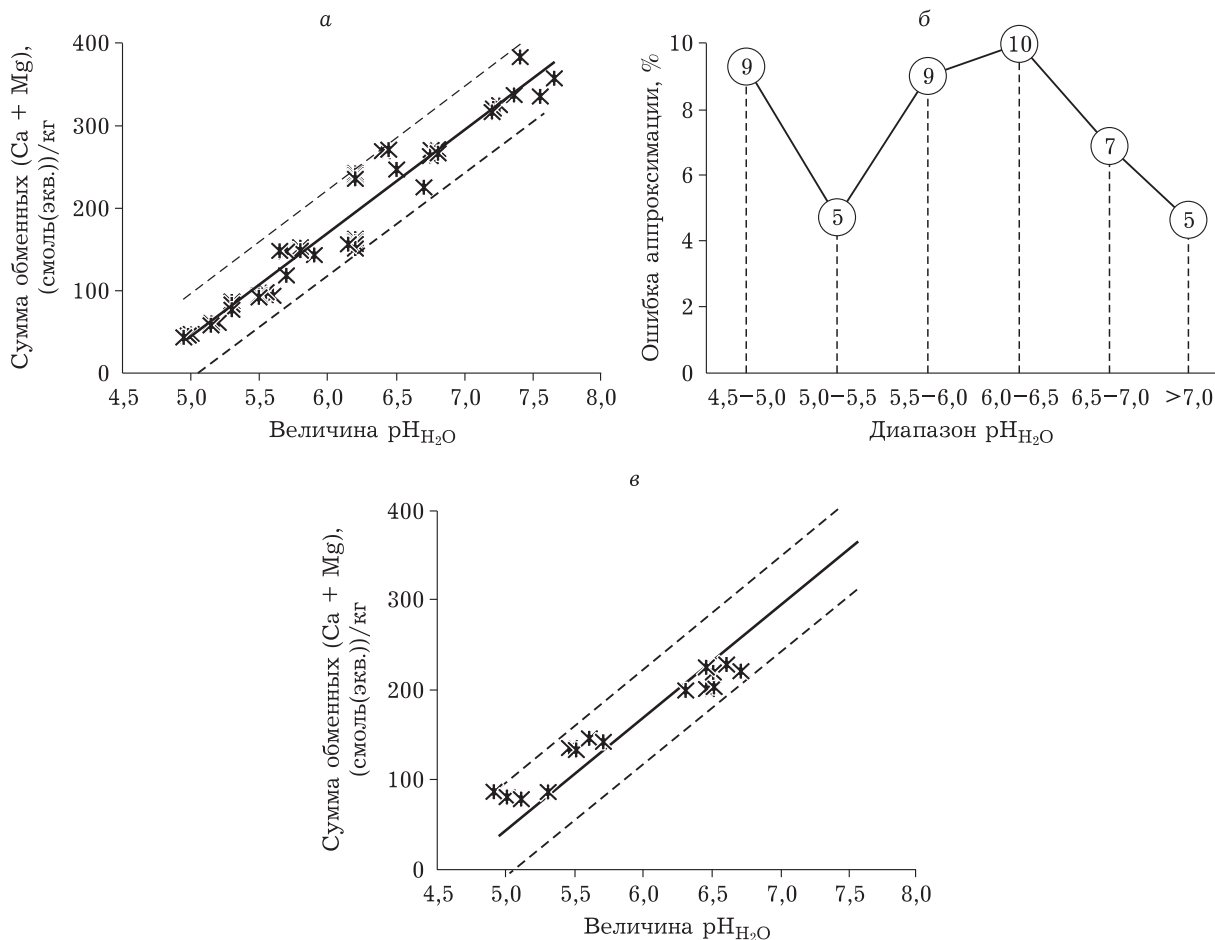


Рис. 5. Регрессионная связь актуальной кислотности (pH_{H_2O}) и суммы щелочноземельных оснований: а, б, в – см. рис. 2

и анатомии мхов и сосудистых болотных растений.

Критерии по химическому принципу реально “работают”, о чем, в частности, свидетельствует достоверная формализованная группировка торфяных почв в геохимические ассоциации (кластеры) по кислотно-основным показателям [Ефремова и др., 2018]. Выполнено также объективное разграничение местообитаний болотных сосняков Западной Сибири на типы и подтипы, оценена их лесопригодность и даны рекомендации по хозяйственному освоению [Ефремова, Аврова, 2014].

ВЫВОДЫ

1. Впервые выполнена математическая формализация кислотно-основных свойств торфяных почв в диапазоне зольности (6,8–50,7 %) и условий среды от кислой (pH_{H_2O} 4,7)

до щелочной (pH_{H_2O} 7,9). Построены высокозначимые линейные регрессионные модели связи содержания обменных катионов и оснований (Ca + Mg), обменной pH_{KCl} и гидролитической (общей) кислотности, а также степени насыщенности основаниями с актуальной кислотностью pH_{H_2O} ($R^2 = 0,87-0,98$).

2. Применение регрессионных уравнений избавляет от выполнения трудоемких аналитических работ, что позволяет оперативно осуществлять классификацию болот и торфяных почв на типы (олиготрофные, мезотрофные, эутрофные) и подтипы (олигомезотрофные, мезоэутрофные) по химическому принципу – насыщенности щелочноземельными основаниями и величине pH_{KCl} . Индикаторная роль ботанического состава может заслуживать доверия при условии невысокой степени разложения торфов и специальных знаний морфологии и анато-

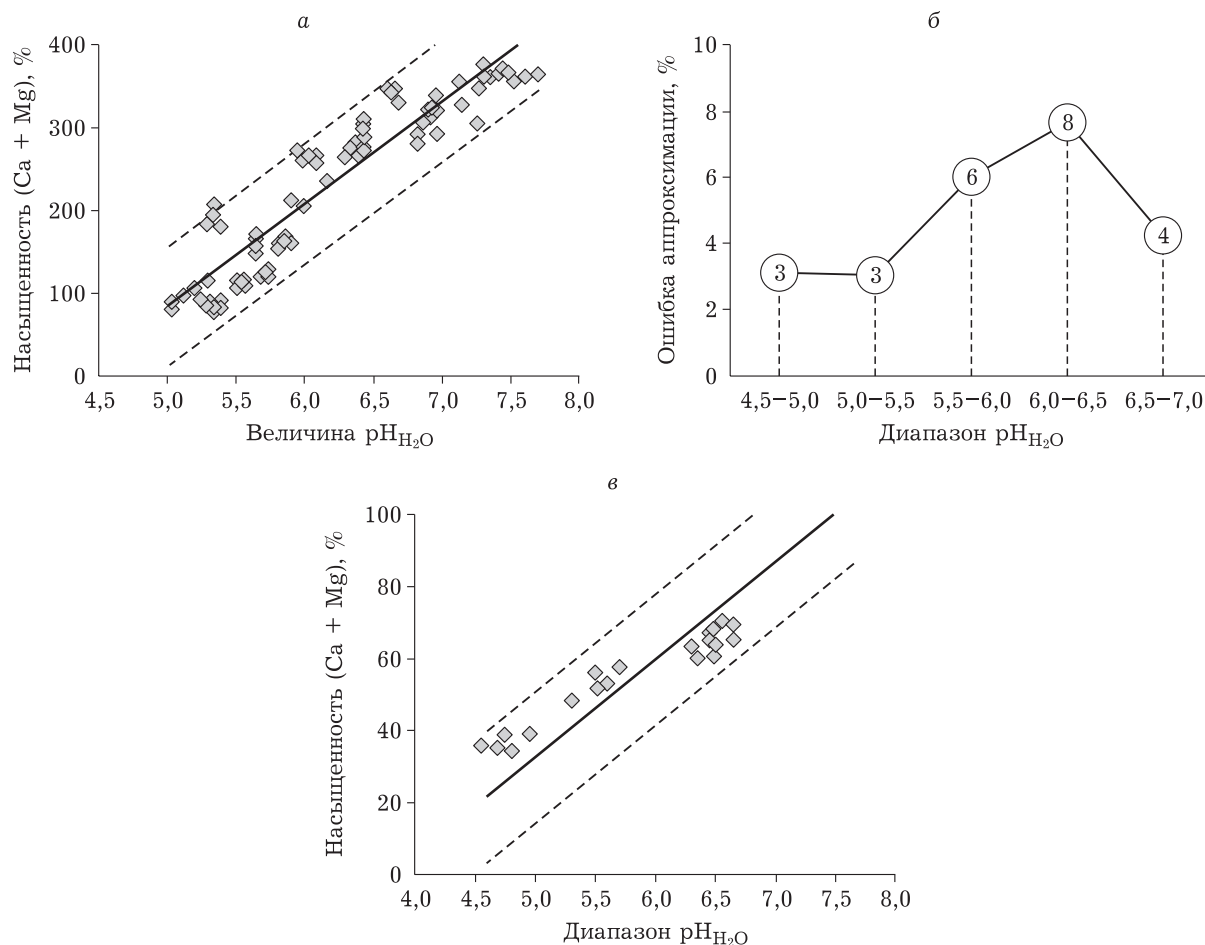


Рис. 6. Регрессионная связь актуальной кислотности (pH_{H_2O}) и степени насыщенности основаниями: а, б, в – см. рис. 2

мии сфагновых мхов и сосудистых болотных растений.

Работа выполнена в рамках базового проекта VI.52.2.1. “Биоразнообразие коренных хвойных и производных лесных экосистем” (№ 0356-2016-0301).

ЛИТЕРАТУРА

- Ариушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ.; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1986. Кн. 1. 366 с.
- Елисеева И. И., Курьшева С. В., Костеева Т. В., Бабаева И. В., Михайлов Б. А. Эконометрика. М.: Финансы и статистика, 2003. 344 с.
- Ефремова Т. Т. Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // Почвоведение. 1992. № 12. С. 25–35.
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф. Оценка местообитаний болотных сосняков южной тайги Западной Сибири в целях гидромелиорации // Лесоведение. 2014. № 3. С. 31–38.
- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Мелентьева Н. В., Аврова А. Ф. Высотная дифференциация кислотно-основных свойств долинных торфяных почв Кузнецкого Алатау // Вестн. Том. ун-та. Биология. 2018. № 41. С. 135–155. doi: 10.17223/19988591/41/8.
- Инишева Л. И. Торфяные почвы: их генезис и классификация // Почвоведение. 2006. № 7. С. 781–786.
- Классификация и диагностика почв России / авт. и сост.: Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Лопатин В. Д. Принципы установления границ переходных болот по растительному покрову и задачи дальнейших исследований по диагностике типов болот по растительности / Основные принципы изучения болотных биогеоценозов. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. С. 22–29.
- Морозова Р. М. К вопросу о классификации болотных осушенных почв // Изменение лесоболотных биогеоценозов под влиянием осушения. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1986. С. 108–124.
- Никонов М. Н. Закономерности распределения кислотности торфяных залежей и некоторые основные свойства торфов // Тр. ЦТБОС–МТИ. 1960. Т. 1. С. 91–123.
- Пьявченко Н. И. Торфонакопление и его продуктивность // Динамика органического вещества в про-

- цессе торфообразования. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1978а. С. 141–155.
- Пьявченко Н. И. О диагностике типов торфяных почв и залежей при изысканиях и проектировании лесоосушительных мелиораций // Исследования по лесному болотоведению и мелиорации. Петрозаводск: Ин-т леса Карел. фил. АН СССР, 1978б. С. 24–30.
- Пьявченко Н. И., Корнилова Л. И. О диагностических показателях типов торфа // Почвоведение. 1978. № 10. С. 146–153.
- Скрынникова И. Н. К вопросу об истории исследования, принципах классификации и систематики болотных почв СССР // Там же. 1954. № 4. С. 37–50.
- Торфяные ресурсы мира: справочник / под общ. ред. А. С. Оленина. М.: Недра, 1988. 383 с.
- Халафян А. А. STATISTICA-6. Статистический анализ данных: учебник. 3-е изд. М.: ООО “Бином-Пресс”, 2007. 515 с.
- Jeglum J. K., He F. Pattern and vegetation – environment relationships in a boreal forested wetland in northeastern Ontario // Canad. Journ. Bot. 1995. Vol. 73. P. 629–637.
- Locky D. A., Bayley S. E., Vitt D. H. The vegetational ecology of black spruce swamps, fens, and bogs in southern boreal Manitoba, Canada // Wetlands. 2005. Vol. 25, N 3. P. 564–582.
- Sjörs H., Gunnarsson U. Calcium and pH in north and central Swedish mire waters // J. Ecol. 2002. Vol. 90. P. 650–657.

Regression models of acid-base properties of peat swamps as operational criteria for their chemical classification

T. T. EFREMOVA, A. F. AVROVA

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of SB RAS
V. N. Sukachev Institute of Forest of SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: efr2@ksc.krasn.ru*

The quantitative relationships of active acidity ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) of peat soils with the value of exchange acidity (pH_{KCl}), nonexchangeable (total potential) acidity (1M CH_3COONa extract), and the content of exchange cations and alkaline-earth bases, as well as the degree of bases saturation were established by the type of linear function. The coefficients of the regression equations are given. Using independent data, we proved the high predictive capability of regression models. Using the regression equations eliminates the time-consuming execution of analytical works, which allows to quickly classification the wetlands and peat soils on the chemical principle – saturation of alkaline-earth bases and pHvalue. The indicator role of the botanical composition may be credible provided the low peat decomposition degree and special knowledge of morphology and anatomy of sphagnum mosses and vascular bog plants.

Key words: swamps, peat soil, acidity, exchange bases, diagnostics, paired regression analysis.